

---

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Électronique  
Spécialité Instrumentation  
présenté par

Touami Aymen Abdessalem

&

Khouira Ayoub

---

# Traitement des signaux vibratoires : Application au diagnostic des défaillances dans une centrale électrique

---

Proposé par : Akhrib Djamel & Mebarki Abderrazak

Année Universitaire 2021-2022

## Remerciements

---

*Nous remercions tout d'abord notre dieu qui nous a donné la force pour terminer ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier tous les enseignements du département de génie électrique et plus particulièrement notre promoteur: **Mr. Akhrib**, Qui nous a énormément aidés durant l'élaboration de ce travail.*

*Et remercions: **Mr. Mebarki**, et tous les travailleurs d'IFEG.*

*Nous remercions enfin tous nos amis de promotion ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.*

*- Touami & Khouira -*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents, que dieu les protège pour  
leur soutien moral et financier,*

*A mes frères et ma sœur,*

*A toute ma famille,*

*A ceux qui ont partagé avec moi tout les moments  
d'émotions lors de la réalisation de ce travail,*

*A mes amis et mes collègues.*

*Touami Aymen Abdessalem*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents, que dieu les protège pour  
leur soutien moral et financier,*

*A mes frères et mes sœurs,*

*A toute ma famille,*

*A mes amis et mes collègues.*

*Khouira Ayoub*

---

## ملخص:

يخصص هذا العمل لتشخيص مشاكل الزاوجة عن الاهتزازات عن طريق استغلال الإشارات الاهتزازية، يمكن أن تكون المعلومات المهمة الواردة في الإشارات عالمية على الصحة الجيدة أو السيئة آلة دوران.

بينما العمل على المناهيم الأساسية لتشغيل المولد التوربيني، ثم الجزء المخصص لوصف الأدوات المخزنة المشاركة في عملية توليد الطاقة بوحدة الإنتاج (إضافة إلى أنماط التماس) وسببها ومطلوبا، تمت مناقشة التحليل الطيفي باستخدام FFT هو الأداة الرئيسية للمقارنة المشروطة المستخدمة للكشف الأخطاء.

كلمات المفاتيح: تحليل الاهتزازات، مستويات الإنذار، واجهة الإنسان و الآلة IHM، التشخيص والكشف عن الأخطاء، تحليل الطيف FFT.

---

## Résumé :

Ce travail est consacré au diagnostic de défauts vibratoires (défauts de paliers lisses) de la machine synchrone (générateur) par exploitation des signaux vibratoires, Les informations importantes contenues dans les signaux peuvent être extraites et constituent un signe de bonne ou mauvaise santé d'une machine tournante.

Nous avons traité les notions de base du fonctionnement du turboalternateur, et par la suite la partie dédiée a la description des différents instruments impliquées dans le processus de production de l'électricité les modes de mesures (relative & absolue), ont été abordés l'analyse spectrale à l'aide de la transformée de Fourier rapide FFT est l'outil principal de la maintenance conditionnelle utilisée pour la détection des défauts.

**Mots clés :** analyse vibratoire, niveau d'alarme, analyse spectral FFT, interface homme machine IHM, diagnostic et détection de défaut.

---

## Abstract :

This work is devoted to the diagnosis of vibration defects (plain bearing defects) of the synchronous machine (generator) by the exploitation of vibration signals, The important information contained in the signals can be extracted and is a sign of good or bad health of a rotating machine.

We have dealt with the basic notions of the operation of the turbogenerator, and subsequently the part dedicated to the description of the various instruments involved in the process of electricity production the modes of measurement (relative &

---

---

absolute), spectral analysis was discussed using the Fast Fourier transform FFT is the main tool of conditional maintenance used for fault detection.

**Keywords:** vibration analysis, alarm levels, HMI man machine interface, diagnostic and fault detection, FFT spectral analysis.

---

## Listes des acronymes et abréviations

**SKE**: Shariket Kahraba El-Djazair

**RP**: Réception Provisoire

**RD**: Réception Définitive

**x(t)** : Déplacement

**v(t)** : La vitesse

**a(t)** : L'accélération

**f** : La fréquence

**t** : Le temps

**TF** : Transformée de Fourier

**SONALGAZ** : Société National d'Électricité et de GAZ

**GAZ** : Gaz à effet de serre

**Nm3** : normo mètre cube

**A** : rotor isotrope

**n** : sens de rotation

**GMAO** : La gestion de maintenance assistée par ordinateur

**BFS++** : en anglais from the German word BetriebsFhrungsSystem; codée en C++

**B**: rotor anisotrope

**G**: sens de gravité de rotor

**a**: sens négatif

**b** : sens positif

**S<sub>1</sub>** , **S<sub>2</sub>** : valeurs instantanées

**S<sub>01</sub>**, **S<sub>02</sub>** : valeurs maximales

**S<sub>u1</sub>**, **S<sub>u2</sub>**: valeurs minimales

**S<sub>cc1</sub>**, **S<sub>cc2</sub>**: valeurs crêtes à crêtes

**S<sub>k</sub>** : déplacement cinétique instantané

**S<sub>max</sub>** : plus grande valeur des déplacements cinétiques instantanés

**K** : orbite cinétique

**G<sub>1</sub>**, **G<sub>2</sub>**: axes de temps

**S<sub>1</sub>(t)**, **S<sub>2</sub>(t)** : déplacement vibratoire dans les directions

**δ(t)** : impulsion de Dirac

**u(t)** : échelon unité

$r$ :taux d'harmoniques

$\delta_T(t)$ : la peigne de Dirac de période

**FFT** : Fast Fourier Transforms



# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>17</b>
<b>CHAPITRE 1 PRESENTATION DE LA CENTRALE ET DESCRIPTION DE LA TURBINE A GAZ</b>	
INTRODUCTION .....	20
PRESENTATION DE LA CENTRALE ELECTRIQUE.....	20
Principales données techniques .....	21
Les principaux paramètres de performance moyenne de la centrale .....	23
Emplois et accueil des étudiants et stagiaires .....	24
Sécurité industrielle et préservation de l'environnement.....	24
La fonction maintenance de la centrale .....	24
Système de gestion des centrales.....	25
<i>Taches fondamentales de BFS++ .....</i>	<i>25</i>
<i>BFS++ liaison entre toute l'équipe.....</i>	<i>26</i>
DESCRIPTION DE LA TURBINE A GAZ V94.3A4.....	26
Principe de fonctionnement.....	26
Avantages et caractéristique de la turbine à gaz V94.3A4 .....	27
CONCLUSION .....	27
<b>CHAPITRE 2 TECHNIQUES ET MODELITES D'ANALYSE DES VIBRATIONS</b>	
INTRODUCTION .....	30
DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS DE VIBRATION .....	30
Le capteur de déplacement .....	32
<i>Principe de mesure.....</i>	<i>33</i>
<i>Schéma électrique équivalent .....</i>	<i>34</i>

<i>Caractéristique</i> .....	34
<i>Courbes de réponse</i> .....	35
Le capteur de vitesse - le vélocimétrie .....	35
<i>Description et principe de mesure</i> .....	36
<i>Réponse en fréquence typique</i> .....	37
Le capteur d'accélération - accéléromètre .....	37
<i>Principe de mesure</i> .....	38
<i>Réponse en fréquence</i> .....	39
<i>Sélection</i> 39	
<i>Fréquence de résonance</i> .....	39
Le capteur de phase .....	40
LES AVANTAGES ET LES DESAVANTAGES DES CAPTEURS .....	40
LES MODES DE MESURES DE VIBRATION .....	41
Vibration absolue de paliers .....	41
Vibration relative d'arbre .....	43
<i>Intérêt des mesures de vibrations d'arbre</i> .....	44
<i>Mesure de l'orbite cinétique</i> .....	45
Vibration absolue d'arbre .....	47
CONCLUSION .....	47

### **CHAPITRE 3 TRAITEMENT DE SIGNAL**

LES CONCEOTION DU TRAITEMENT DE SIGNAL .....	49
Introduction et généralités sur les signaux .....	49
Les classes de signaux .....	49
<i>Temps continu et temps discret</i> .....	49
<i>Variables continues et variables discrètes</i> .....	50

<i>Signaux périodiques et signaux apériodiques</i> .....	50
Energie, puissance .....	51
<i>Définitions</i> 51	
<i>Remarques</i> 51	
La transformée de Fourier .....	52
<i>Généralités</i> 52	
<i>Définitions</i> 52	
<i>Propriétés</i> 53	
<i>Linéarité</i> 54	
<i>Décalage en temps/fréquence</i> .....	54
<i>Dérivation</i> 54	
<i>Dilatation en temps/fréquence</i> .....	55
<i>Conjugaison complexe</i> .....	55
<i>Convolution de deux signaux</i> .....	56
Représentation de fourrier des signaux d'énergie infinie .....	57
<i>Impulsion de Dirac</i> .....	57
<i>Spectre des signaux périodiques</i> .....	59
<i>Cas particulier – peigne de Dirac</i> .....	60
Notion de filtre linéaire.....	61
<i>Linéarité</i> 61	
<i>Invariance</i> 62	
<i>Fonction de transfert</i> .....	63
CONCLUSION .....	64

## CHAPITRE 4 ANALYSE DE DEFAUTS

INTRODUCTION .....	66
ORIGINES DE VIBRATION .....	66
Les sources d'excitation.....	66
Le balourd mécanique .....	66
<i>Définition</i> 66	
<i>Typologie de balourd</i> .....	67
<i>Ambiguïtés de diagnostic</i> .....	67
Le délignage .....	67
<i>Les conséquences du délignage</i> .....	67
<i>Typologie du délignage</i> .....	68
<i>Origines du délignage</i> .....	68
<i>Ambiguïtés de diagnostic</i> .....	68
Les chocs périodiques.....	68
<i>Typologie des chocs périodiques</i> .....	69
<i>Ambiguïtés de diagnostic</i> .....	69
LES APPAREILS DE MESURES.....	69
La surveillance on-line.....	70
La surveillance off-line.....	70
Les fonctionnalités des appareils de surveillance .....	70
Couplage des appareils.....	71
Les paramètres de surveillances .....	71
Périodicité des mesures .....	71
MESURES D'ALIGNEMENT DE LA TURBINE .....	72
Analyse spectral de la vibration du signal mesuré coté excitatrice .....	73

Reconnaissance des défauts .....	74
<i>Défaut d'alignement</i> .....	75
Remèdes 75	
CONCLUSION.....	75
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>78</b>

## Listes des figures et tableaux

Fig I.1 : localisation de la centrale

Fig I.2 : Turbine à gaz SIEMENS V94.3A(4) SGT5-4000(E)

Fig I.4 : Schéma technique de passage de gaz dans la turbine

Fig I.3 : Structure de maintenance de la centrale

Fig II.1 : Relation entre déplacement, vitesse et l'accélération

Fig II.2 : Capteur sans contact à courant de Foucault (TQ102)

Fig II.3 : Chaîne de mesure de proximité

Fig II.4 : Chaîne de proximité : Schéma électrique équivalent

Fig II.5 : Capteur de vitesse « VS 080 »

Fig II.6 : Architecture d'une vélocimétrie

Fig II.7 : Réponse en fréquence typique d'un capteur électrodynamique

Fig II.8 : Capteur d'accélération (accéléromètre, CA 136)

Fig II.9 : Principe de mesure

Fig II.10 : Montage en compression

Fig II.11 : Montage en cisaillement

Fig II.12 : Réponse en fréquence d'un accéléromètre

Fig II.13 : Capteur de phase (cellule photoélectrique SCHENCK)

Fig II.14 : Mesure de phase

Fig II.15 : Point de mesures recommandées

Fig II.16 : Placement des accéléromètres

Fig II.17 : Capteurs vélocimétries placés sur un moteur-pompe dans les trois directions

Fig II.18 : Placement des capteurs de proximité

Fig II.21 : Orbite cinétique constituée à partir de deux capteurs sans contact

Fig II.20 : Montage typique de deux capteurs sans contact permettant de mesurer l'orbite cinétique d'un arbre dans ses paliers

Fig II.19 : L'orbite cinétique

Fig. III.1 : Signal à temps continu

Fig. III.3 : Signal à valeurs discrètes

Fig. III.2 : Signal à temps discret

Fig VI.1: Accelerometre

Fig VI.2: proximetre

Fig VI.3 : Alarm annoncée sur IHM palier alternateur côté excitatrice

**Fig IV.4 : La valise schenk exploiter pour la mesure**

Fig VI.5 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement

Tableau I.1 : Dates principaux des évènements liés au groupe

Tableau I.2 : *Fabricants des principaux systèmes*

Tableau I.3 : Caractéristiques turbine à gaz V94.3A(4) SGT5-4000(E)

Tableau I.4 : Caractéristiques de groupe alternateur 01 SGen5-1000A (118/46)

Tableau I.5 : Caractéristiques de groupe alternateur 02 SGen5-1000A (118/55)

Tableau III.1 : tableau récapitulatif des signaux Pair et Impair

Tableau IV.1 Etat du couplement coté alternateur

Tableau IV.2 Etat du couplement coté turbine

# Introduction Générale



## Introduction :

Dans divers secteurs industriels, la disponibilité et le coût sont des facteurs clés pour assurer une continuité optimale de la production. Tout changement indésirable ou un arrêt inattendu provoque des pertes économiques considérables. Pour éviter ce genre de problèmes, les chaînes de production doivent être équipées de systèmes de diagnostic fiables permettant de détecter tout défaut ou changement dans l'état de fonctionnement avant la défaillance totale.

De tous les types de surveillance, l'analyse vibratoire est la méthode la plus largement utilisée pour une surveillance et un diagnostic fiable et pour détecter l'apparition et le développement de la plupart des défauts d'origines diverses. (Mécanique, électrique, hydraulique...etc.).

Ce travail de maintenance est d'une grande importance économique, car il permet une transition d'une maintenance systématique à une maintenance conditionnelle plus efficace.

Le principe de l'analyse vibratoire est que toutes les machines tournantes (moteurs Électrique, pompes, compresseurs, turbines ...) basée sur l'idée qu'en fonctionnement elles génèrent des vibrations, qui sont causées par des défauts: balourd, désalignement, défaut de palier, denture d'engrenage, ... qui génèrent des vibrations.

Ceux-ci émettent des signaux vibrants très complexes. Pour analyser ces signaux, nous avons utilisé l'analyseur de signal VIBROPORT41 (schenck) pour la saisie des données, l'analyse des vibrations et l'équilibrage de fonctionnement, Et à travers elle, nous pouvons d'identifier et de localiser le défaut.

Le but de notre travail est d'appliquer l'analyse vibratoire dans le diagnostic de ces défauts afin d'améliorer la maintenance préventive des équipements et de connaître l'évolution de ces défauts pour permettre de planifier les opérations de remplacement des composants défectueux, le stock de pièces détachées et outillages nécessaires, ainsi que le personnel spécialisé.

Notre travail est subdivisé en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** concerne une petite présentation de l'entreprise tout en précisant le type de turbine installée V94.3A .
- **Le deuxième chapitre** on a proposé une vue complète sur les techniques et les moyens d'analyse vibratoire, pour cela on a approché les notions fondamentales de

diagnostic vibratoire.

- **Le troisième chapitre** est limité aux notions du traitement de signal

- **Le quatrième chapitre** s'oriente vers l'analyse des défauts trouvés lors des différentes opérations de l'inspection majeure, en fin on termine par proposition des Remèdes donnant une solution définitive au problème rencontré.

On achève notre travail par une conclusion générale.

# ***Chapitre01***

## ***Présentation de la centrale et description de la turbine à gaz***

## I.1- Introduction :

Shariket Kahraba El-Djazair «SKE Spa» s'inscrit dans le cadre de la diversification des producteurs de l'électricité au niveau du marché national et ce conformément à la loi N°02-01 du 05 Février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisations. Cette dernière est une société par actions détenue à hauteur de :

- 51% par SONELGAZ
- 49% par SONATRACH Holding AIE.

La société SKE Spa est composée de quatre (04) unités pour une puissance totale installée de 3582 MW, il s'agit des trois (03) centrales en cycle combiné de :

- Koudiet eddraouche
- Targa
- Skikda

Et une (01) Centrale Cycle Simple (turbines à gaz) de Berrouaghia.

La Centrale de Berrouaghia est située à la Zone Industrielle de Berrouaghia (Wilaya de Médéa).



Fig I.1 : localisation de la centrale

## I.2- Présentation de la centrale électrique :

La Centrale de Berrouaghia est une unité qui œuvre dans le domaine de la production et commercialisation de l'énergie électrique. Elle atteint une énergie moyenne annuelle productible de 3200 GWh avec une puissance installée de 489,3 MW aux conditions site. (Altitude : 928 m NGA, Température moyenne : + 15.5 °C et Humidité moyenne : 67 %).

Sa mission est d'assurer un renforcement du réseau national interconnecté et la fiabilité et la continuité en mettant à la disposition de l'Opérateur Système les services des groupes fonctionnant en AGC (Automatic Generation Control).

	Groupe 01	Groupe 02
1er allumage	18 Mai 2007	21 Juillet 2007
1ère synchronisation	10 Juillet 2007	03 Août 2007
Mise en service commercial	06 Septembre 2007	20 Septembre 2007
Réception Provisoire (RP)	04 Novembre 2009	30 Novembre 2009
Réception Définitive (RD)	05 Août 2015	05 Août 2015

Tableau I.1 : Dates principaux des événements liés au groupe

### I.2.1- Principales données techniques :

- Type de centrale : Cycle simple.
- Puissance : 2\*245 MW (conditions site).
- Consommation spécifique au PCS : 2.45 th/KWh (selon le contrat ECA).
- Combustible : Gaz naturel.
- Combustible de secours : Gas-oil.
- Evacuation d'énergie : Deux transformateurs 16.5/225 KV.

La centrale est constituée de deux unités de production composées chacune de :

- 01 Turbine à gaz SIEMENS du type V94.3A (4) SGT5-4000(E).
- 01 Générateur.
- 01 Transformateur principale.
- 01 Transformateur de soutirage pour les auxiliaires.
- Un bloc administratif et salle de contrôle.
- Magasin pièces légères.
- Magasin pièces lourdes.
- Un poste gaz.
- Atelier de maintenance.
- Station de pompage de gas-oil.
- Station d'air comprimé.
- Station anti-incendie.
- Station de traitement de l'eau.

- Un laboratoire.
- Contrôle commande T3000 et Win TS.
- BFS++ (GMAO).

Nom du fabricant	Équipement ou Système
<b>SIEMENS</b>	- Turbines à Gaz - Alternateurs, - Système de Contrôle & Commande - Travée 220 KV .
<b>REPCO</b>	Poste Gaz
<b>AREVA</b>	Disjoncteurs de Groupes
<b>KONCAR / OCREV</b>	Transformateurs principaux / auxiliaires
<b>CHAMCO</b>	Station anti-incendie
<b>ALBATROS</b>	Station de traitement de l'eau

Tableau I.2 : Fabricants des principaux systèmes

Caractéristiques Turbine a gaz	
<b>fabricant</b>	SIEMENS
<b>Type</b>	V94.3A(4) SGT5-4000(E)
<b>Compresseur</b>	Quinze (15) étages
<b>Chambre de Combustion</b>	Annulaire a 24 bruleurs
<b>Turbine</b>	Quatre (04) étages en acier réfractaire
<b>Vitesse de rotation</b>	3000 Tr/min
<b>Fréquence</b>	50 Hz.
<b>Puissance active</b>	271 MW (ISO)
<b>Rendement</b>	39,2 %
<b>Température échappement</b>	577 °C

Tableau I.3 : Caractéristiques turbine à gaz V94.3A(4) SGT5-4000(E)

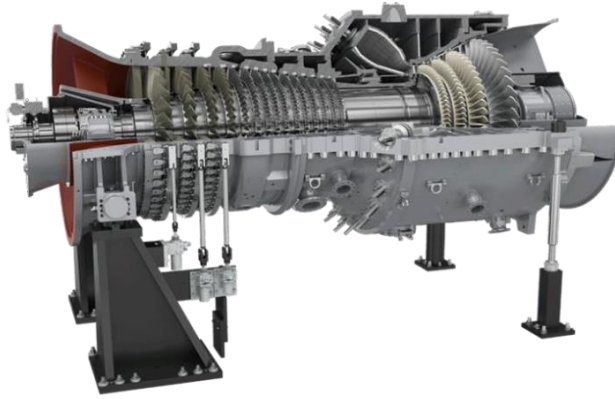


Fig I.2 : Turbine à gaz SIEMENS V94.3A(4) SGT5-4000(E)

Caractéristiques groupe Alternateur 01	
<b>fabricant</b>	Westinghouse/Siemens
<b>Type</b>	SGen5-1000A (118/46) installé en 2007
<b>Puissance apparente</b>	308 MVA
<b>Facteur de puissance</b>	0,8
<b>Ampérage statorique</b>	10 777 A
<b>Tension statorique</b>	16 500 Voltes
<b>Nombre de phase</b>	03
<b>Ampérage rotorique</b>	1917 A

Tableau I.4 : Caractéristiques de groupe alternateur 01 SGen5-1000A (118/46)

Caractéristiques groupe Alternateur 02	
<b>fabricant</b>	Westinghouse/Siemens
<b>Type</b>	SGen5-1000A (118/55) installé en 2014
<b>Puissance apparente</b>	308 MVA
<b>Facteur de puissance</b>	0,8
<b>Ampérage statorique</b>	10 777 A
<b>Tension statorique</b>	16 500 Voltes
<b>Nombre de phase</b>	03
<b>Ampérage rotorique</b>	1649 A

Tableau I.5 : Caractéristiques de groupe alternateur 02 SGen5-1000A (118/55)

## I.2.2- Les principaux paramètres de performance moyenne de la centrale :

Puissance installée : **489,3 MW**

Disponibilité : **98,45 %**

Consommation Spécifique : **2,529 Th/kWh**

Fiabilité des démarrages : **99 %**

- Notation: Les performances sont conformes aux standards internationaux.

### **I.2.3- Emplois et accueil des étudiants et stagiaires :**

Les emplois direct (total) de la Centrale : 184 agents dont :

- DCB/SKE : 60 agents
- Société de gardiennage SAT : 98 agents
- Sous-traitance locale : 26 agents.

Accueil d'étudiants et stagiaires: Environ 80 par an.

### **I.2.4- Sécurité industrielle et préservation de l'environnement :**

Les valeurs limites des émissions atmosphériques et sonores sont conformes aux normes en vigueur (nationales et internationales). A cet effet :

- La centrale est dotée de capteurs et d'analyseurs d'émissions de NOX, SOX et CO
- La conception des brûleurs permet la réduction du taux d'émissions de NOX
- Des Capotages insonorisant sont conçus pour les Groupes ainsi que des silencieux au niveau des systèmes d'aspiration d'air et d'échappement des gaz pour réduire les nuisances sonores et les rendre conformes aux normes.

En ce qui concerne la sécurité des ouvrages, la centrale est dotée de tous les équipements nécessaires en matière de détection, de protection et de lutte anti-incendie.

### **I.2.5- La fonction maintenance de la centrale :**

La politique de la maintenance de la centrale est basée sur deux volets, à savoir la maintenance de routine et la maintenance lourde:

- La Maintenance de routine est assurée par l'équipe locale de la centrale (Internalisée)
- La Maintenance lourde (Gros entretiens) est assurée dans notre cas par le constructeur (SIEMENS), dans le cadre d'un contrat à long terme (externalisée).

La structure de maintenance de notre centrale est organisée comme suite:



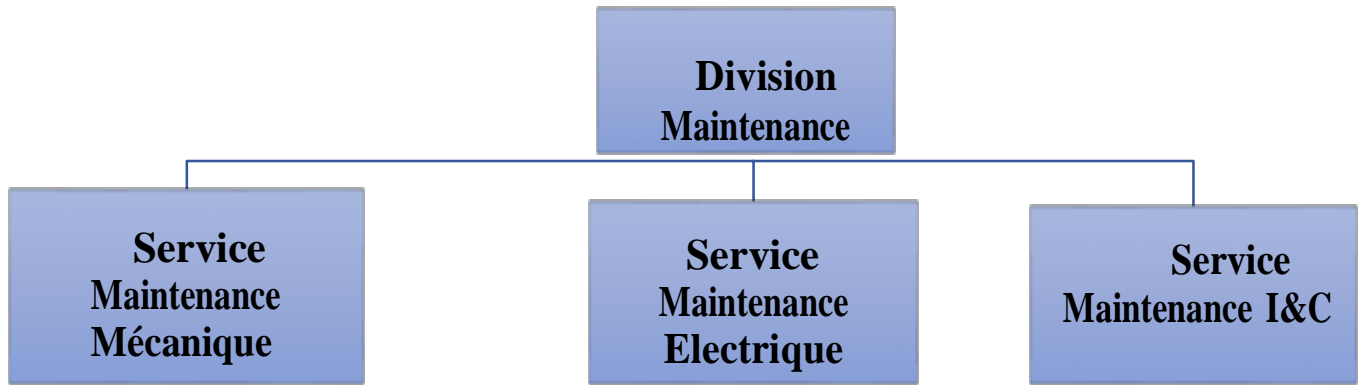


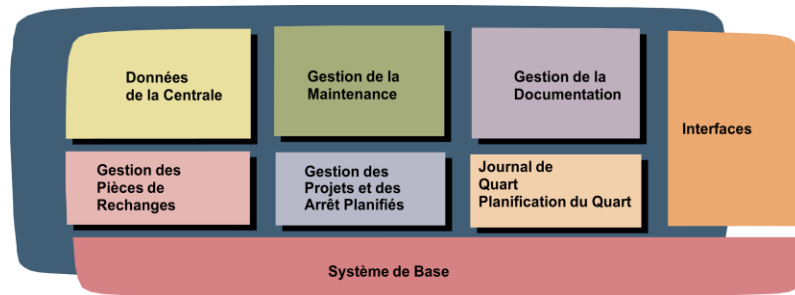
Fig I.3 : Structure de maintenance de la centrale

## I.2.6- Système de gestion des centrales "BFS++" (GMAO) :

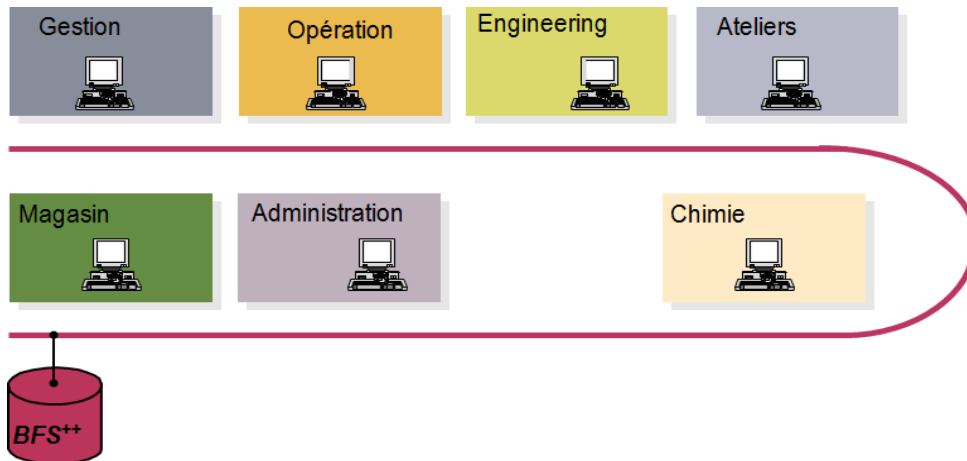
Ces opérations sont gérées par un système GMAO dénommé "BFS++" (Système de SIEMENS)

### I.2.6.1- Taches fondamentales de BFS++ :

- **Système d'information** : fournissant des informations rapidement et selon les besoins
  - Données de la centrale et historique de la maintenance des articles de la centrale et de ses équipements.
  - Travaux en cours et ceux planifiés.
  - Événements du quart en cours et notifications des défauts.
  - Données des pièces de rechange et leurs emplacements de stockage.
- **Système d'exploitation** : support complet des processus de travail
  - Planification, contrôle et évaluation des activités de P.M.
  - Planification et contrôle du procédé de consignation.
  - Planification, contrôle et évaluation du niveau de stock optimal.
- **Système de communication**: transfert d'information de la manière décrite dans l'organigramme de travail
  - Envoi individuel d'information.
  - Envoi automatique d'informations basées sur des règles fixes avec ou sans activités attachées.



### I.2.6.2 : BFS++ liaison entre toute l'équipe :



## I.3- Description de la turbine à gaz V94.3A4 :

### I.3.1- Principe de fonctionnement :

Grâce à un système de lancement (démarrage), le rotor de la turbine est lancé à 20% de sa vitesse nominale. Sur la [figure I.4] Le compresseur axial aspire l'air de l'atmosphère et le refoule dans les chambres de combustion où un apport de combustible permettra de produire un fluide moteur (gaz chaud) à pression constante. Les gaz chauds ainsi produits viennent donc se détendre sur la roue haute pression puis dans la roue basse pression pour s'échapper ensuite dans l'atmosphère. Donc on produit un travail utile pour entraîner la charge, à partir du même rotor.

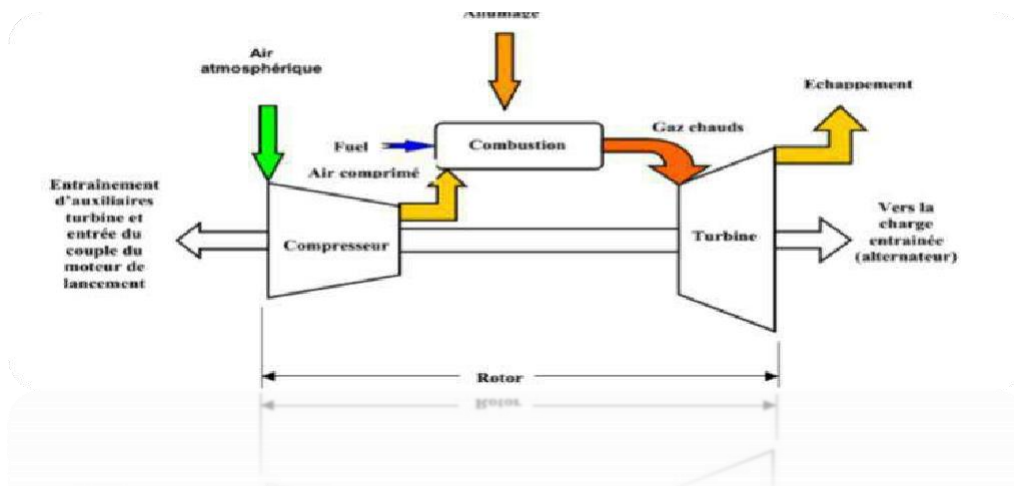


Fig 1.4 : Schéma technique de passage de gaz dans la turbine

### I.3.2- Avantages et caractéristiques de la turbine à gaz V94.3A :

- Combustion dans une chambre de combustion annulaire.
- Brûleurs hybrides pouvant brûler des combustibles liquides et gazeux.
- Système de combustion particulièrement simple et conservatif, donc une grande fiabilité.
- Répartition uniforme de la température des gaz chauds en amont de l'aubage de la turbine. (24 brûleurs).
- Refroidissement par film des deux premiers étages de la turbine
- Rotor extrêmement rigide et léger, supporté par deux paliers, dehors de la zone sous pression.
- Faible inertie thermique du rotor, constitué de disques, donc démarrage et de prise de charge rapides.
- Zone arrière du compresseur et sections de l'enveloppe interne de la turbine suspendues dans une enveloppe externe rigide commune séparée (dilatation libre).
- Toutes les aubes fixes et mobiles de la turbine peuvent être remplacées individuellement sur le site sans soulever le rotor.

### I.4- Conclusion :

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques alimentent en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs, particuliers ou industriels éloignés de la centrale. [12]

La production d'électricité y est assurée par la conversion en énergie électrique

d'une énergie primaire qui peut être mécanique, chimique, force de l'eau, nucléaire au bien solaire.

# ***Chapitre 02:***

## ***Techniques et modalités d'analyse des vibrations***

## - Introduction :

La santé d'une machine peut être appréciée par son comportement vibratoire. La vibration est une grandeur dynamique qui varie rapidement dans le temps. La vibration peut être mesurée :

- En régime transitoire, lors du démarrage ou de l'arrêt de la machine.
- En régime stationnaire, normalement à la vitesse de rotation nominale.
- Les mesures des vibrations permettent de donner des indications sur l'état d'une machine, et c'est la raison pour laquelle, elles peuvent être utilisées judicieusement comme moyen de surveillance.

Pour un suivi correct, les équipements industriels doivent être jugés à l'aide de paramètres présentant deux qualités essentielles :

- Simplicité de la prise de mesure
- Signification importante de leur contenu.

La connaissance de l'état vibratoire de la machine permet d'apprécier sa tranquillité de marche et l'état des différents organes la constituant, et pour cela, il faudrait d'abord avoir une bonne mesure.[1]

## - Différents types de capteurs de vibration :

Les trois types de capteurs de vibration utilisés actuellement en industrie pour la maintenance prédictive sont les capteurs de déplacement, les capteurs inductifs de vitesse et les accéléromètres.

En complément des capteurs classiques, il existe des capteurs capacitifs, des capteurs laser, etc...., mais ceux-ci trouvent leur application plutôt dans le domaine de la recherche et développement (R&D).

Pour un simple signal sinusoïdal, on obtient :

- Déplacement :  $x(t) = A \sin(2\pi f) t$  en [ **$\mu\text{m}$** ]
- Vitesse :  $v(t) = dx / dt = (2\pi f) A \cos(2\pi f) t$  en [ **$\text{mm/s}$** ]
- Accélération :  $a(t) = dv / dt = -(2\pi f)^2 A \sin(2\pi f) t$  [ **$\text{m/s}^2$** ] ou en [ **$\text{g} = 9.81 \text{ m/s}^2$** ]

Signal original	Peut être mesuré en
Accélération	→ Accélération → vitesse → déplacement
Vitesse	→ vitesse → ∫ déplacement
Déplacement	→ déplacement

Valeur crête :

- Déplacement :  $x_c = A$
- Vitesse :  $v_c = (2\pi f) A = (2\pi f) x_c$
- Accélération :  $a_c = (2\pi f)^2 A = (2\pi f)^2 x_c = (2\pi f) v_c$

Les valeurs crêtes du déplacement, de la vitesse et de l'accélération sont alors liées par les relations :

$$\checkmark \quad v_c = (2 \pi f) x_c \iff x_c = (1/2 \pi f) v_c \iff x_c = (0,1591/f) v_c \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$\checkmark \quad a_c = (2 \pi f) v_c \iff v_c = (1/2\pi f) a_c \iff v_c = (159,1/f) a_c \text{ [mm/s]}$$

Exemple:

Un signal vibratoire composé d'une fréquence, d'amplitude crête 100  $\mu\text{m}$  à 10 Hz.

On aura ces relations :

- $x(t) = A \sin (2 \pi f)t = 100 \sin (20\pi)t$  en  $[\mu\text{m}]$
- $v(t) = (2 \pi f) A \cos (2 \pi f)t = 6,28 \cos (20\pi)t$  en  $[\text{mm/s}]$
- $a(t) = - (2\pi f)^2 A \sin (2 \pi f .t) = -0,040 \sin (20\pi)t$  en  $[\text{g}]$

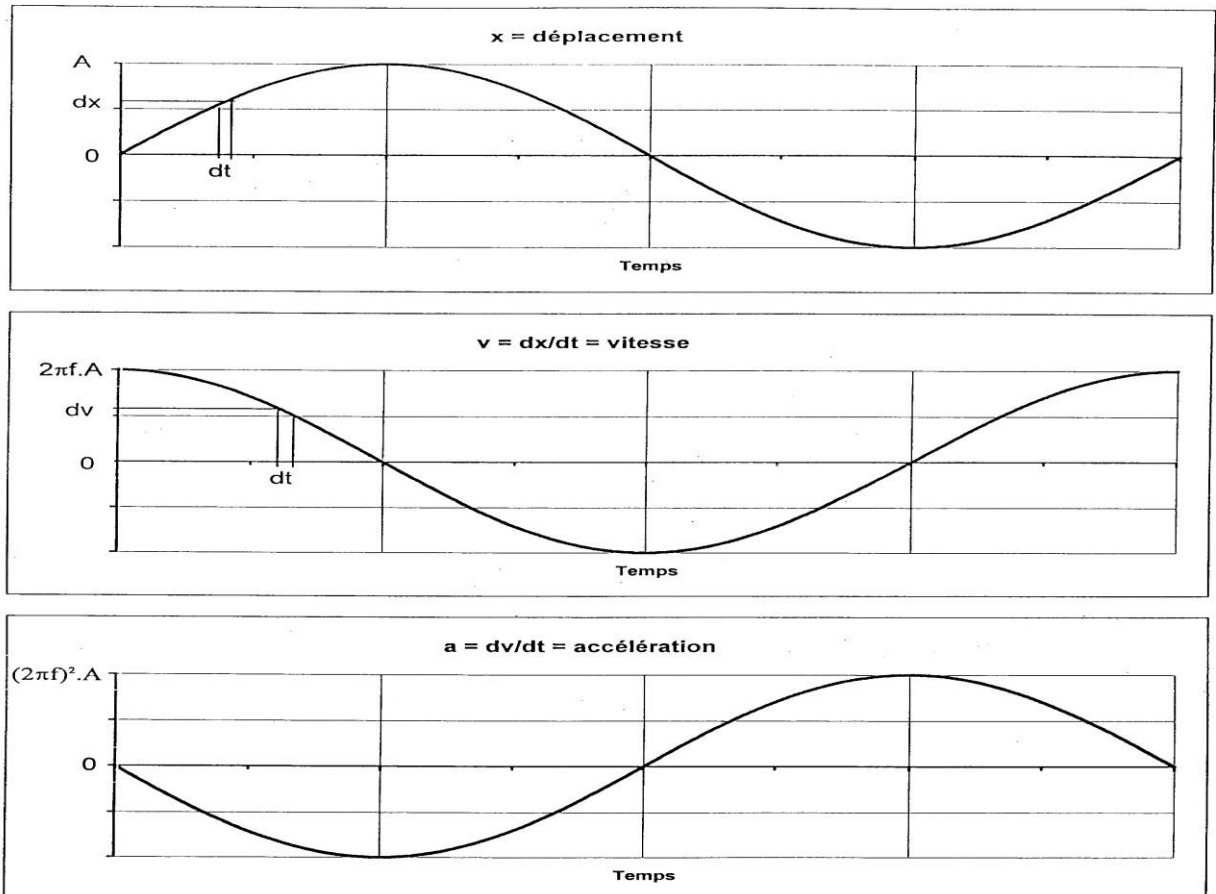


Fig II.1 : Relation entre déplacement, vitesse et l'accélération

**Définition :** En règle générale, un capteur de vibration transforme les vibrations aux points de mesure en une tension électrique. La sensibilité du capteur donne le rapport entre la tension mesurée et la vibration propre.

Il est important que les mesures soient exécutées avec des capteurs calibrés (la décision du démontage ou non d'une machine en dépend).

### II.2.1- Le Capteur de Déplacement :

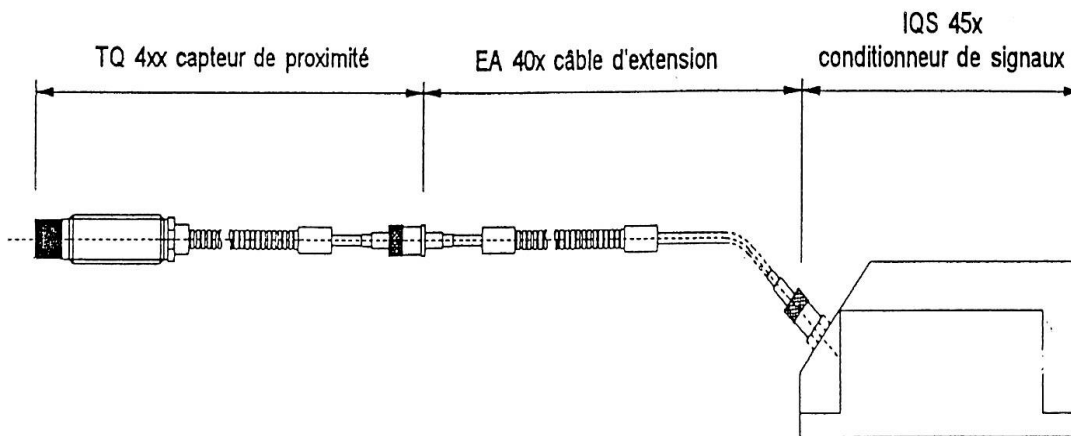
Le capteur de proximité appelé aussi capteur sans contact ou de déplacement permet de mesurer les vibrations relatives de l'arbre d'une machine tournante. Il est également utilisé pour mesurer la distance ou le déplacement et d'autres fonctions encore tels que la position axiale et la référence de phase. Il fournit une tension proportionnelle à la distance entre la tête du capteur et la cible (l'entrefer ou le GAP).





*Fig II.2 : Capteur sans contact à courant de Foucault (TQ102)*

Dans un environnement industriel hostile, on utilise principalement le capteur inductif à courants de « Foucault » car il a une excellente tenue à la température et ses mesures restent fiables même en présence d'huile, de vapeur et de poussières.



*Fig II.3 : Chaîne de mesure de proximité*

### **II.2.1.1- Principe de mesure :**

La tête du capteur contient une bobine protégée par un capuchon en matière synthétique (toron). Cette bobine est parcourue par un courant haute fréquence (1 à 2MHz) provenant du conditionneur de signaux. Des courants de Foucault générés sont alors induits dans la cible, qui doit être une matière métallique.

Le signal oscillant est redressé puis linéarisé par le conditionneur pour donner une tension continue proportionnelle à la distance capteur-cible. L'ensemble capteur conditionneur délivre une tension proportionnelle à la distance entre la tête du capteur et la cible. La courbe de réponse dépendra des caractéristiques de la cible.

Le capteur à courant de Foucault est sensible à tout objet métallique ou métallisé.

Cependant, sa réponse dépend non seulement de la distance de l'objet mais aussi de ses propriétés physiques (résistivité, perméabilité) et de ses caractéristiques

géométriques (forme et dimension).

### II.2.1.2- Schéma électrique équivalent :

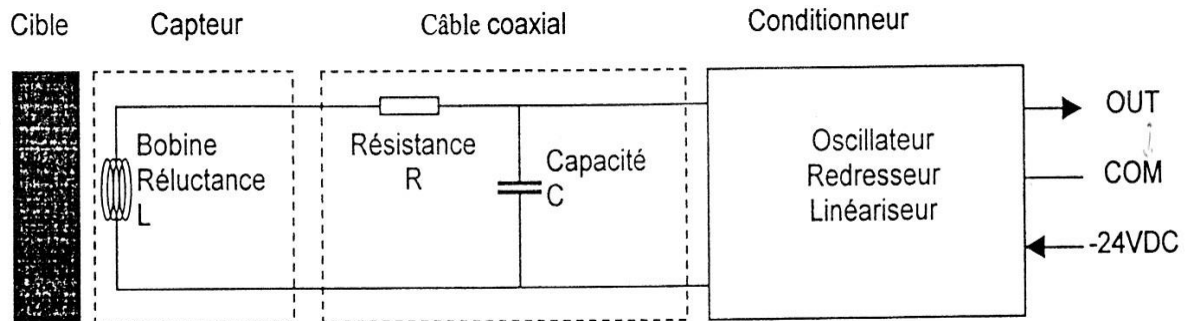


Fig II.4 : Chaîne de proximité : Schéma électrique équivalent

Comme le montre le schéma ci-dessus, la longueur du câble ne peut pas être modifiée car celle-ci agit directement sur les caractéristiques du circuit magnétique. Les systèmes de proximité ne sont généralement disponibles que pour des longueurs fixes, de valeurs typiques 5m et 10m. Un capteur avec câble de 5m ne peut pas être utilisé avec un conditionneur calibré pour 10m.

Un surplus de câbles ne peut pas être sectionné, il doit être enroulé.

### II.2.1.3- Caractéristiques :

- Les principaux critères de sélection d'un capteur de proximité sont :
  - ✓ La sensibilité, s'il s'agit d'une mesure de la vibration.
  - ✓ La distance de mesure, s'il s'agit d'une mesure de position.

La gamme de fréquence ainsi que la température sont fixées et ne sont donc pas des critères de sélection. Exemple pour la série TQ 400 :

- Gamme de fréquence : 0 à 20 KHz.
- Gamme de température : - 40 à 180°C avec une dérive inférieure à 5%  
-180 à 220°C avec une dérive supérieure à 5%.

Type de capteur	TQ 401	TQ 402/412	TQ 403	TQ 407/417
Plage de mesure	2mm	4mm	12mm	2mm
Diamètre de la tête	5mm	8,2mm	18mm	8,2mm
Longueur du câble entre le capteur et son conditionneur	-5m	-5m -10m	-5m -10m	-5m
sensibilité	8mV / $\mu\text{m}$	4mV / $\mu\text{m}$	1,33mV / $\mu\text{m}$	8mV / $\mu\text{m}$

#### II.2.1.4- Courbes de réponse :

Un capteur de proximité est calibré pour une cible en acier défini. Pour un autre type d'acier ou pour un autre matériel, la courbe de réponse sera différente : il y aura un décalage de la sensibilité dont il faut tenir compte dans la mesure.

#### II.2.2- Le Capteur de vitesse – le Vélocimètre :

Le vélocimètre permet de mesurer les vibrations absolues des paliers d'une machine tournante. C'est un capteur sismique de type électromagnétique. Il se compose d'un aimant permanent solidaire du boîtier qui génère une induction magnétique constante B et d'une bobine mobile liée au boîtier par deux ressorts plans. Sous l'effet de la vibration, la bobine se déplace dans le champ magnétique de l'aimant. Une tension apparaît aux deux extrémités du fil de la bobine, proportionnelle à la vitesse de vibration.



Fig II.5 : Capteur de vitesse « VS 080 »

### II.2.2.1- Description et principe de mesure :

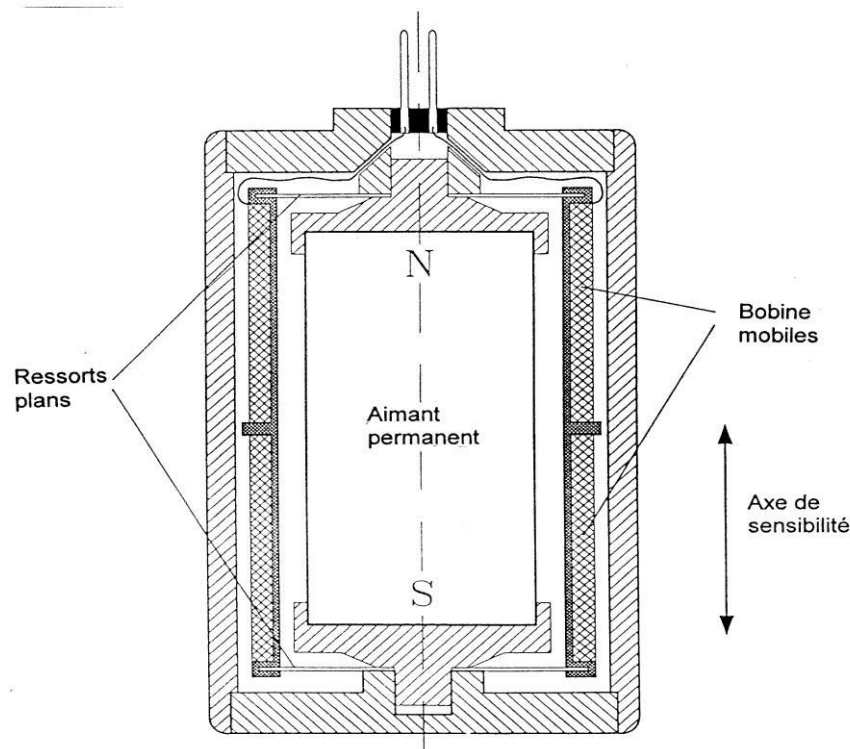


Fig II.6 : Architecture d'un vélocimètre

Le vélocimètre a l'avantage de fournir une mesure directe de la vitesse de vibration sans utiliser de conditionneur ou d'amplificateur. Par contre, il est moins fiable pour différentes raisons :

- Il y a usure mécanique des pièces en mouvement. En présence de vibrations transversales hautes fréquences permanentes, il peut être endommagé en quelques mois.
- Il ne supporte pas des températures supérieures à 100°C.
- Sa réponse en phase n'est pas linéaire, surtout pour les basses fréquences : il n'est donc pas approprié pour certains types de mesures nécessitant la fidélité de la phase.

Le vélocimètre peut être modélisé par un système masse ressort-amortisseur. Il présente également une résonance, mais beaucoup moins marquée. La plage de mesure typique sans linéarisation d'un vélocimètre est comprise entre 8 et 2000Hz.

Parmi tous les systèmes physiquement susceptibles de mesurer une vitesse de vibration, le principe électrodynamique est le plus robuste et le plus facile à mettre en œuvre.

### II.2.2.2- Réponse en fréquence typique :

La caractéristique représente la tension de sortie d'un capteur électrodynamique en fonction de la fréquence de vibration à vitesse de vibration constante.

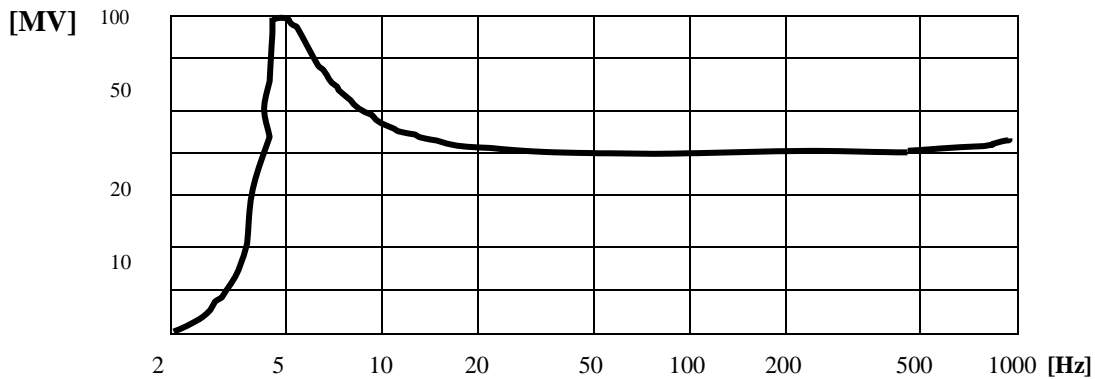


Fig II.7 : Réponse en fréquence typique d'un capteur électrodynamique

### II.2.3- Le Capteur d'accélération – L' accéléromètre :

L'accélération, d'après les principes fondamentaux de la mécanique, est une relation entre la force et la masse. Les capteurs d'accélération sont des capteurs de mouvement n'ayant besoin d'aucun point de référence. Leur légèreté, leurs dimensions réduites, leur autonomie et leur fiabilité sont parmi les avantages les plus remarquables.

De façon à obtenir les résultats les plus fiables, particulièrement aux fréquences les plus hautes, il est de toute importance que l'accéléromètre soit solidement fixé au point de mesure, et à la même place pour toutes les mesures.



Fig II.8 : Capteur d'accélération (accéléromètre, CA 136)

Le capteur d'accélération est très souvent le mieux adapté à la mesure des vibrations et des chocs, pour les raisons suivantes :

Une mesure d'accélération peut toujours permettre de connaître la vitesse et le

déplacement par simple ou double intégration, le cheminement inverse n'étant pas souhaitable, compte tenu de la dégradation du rapport signal / bruit inhérente à l'opération de dérivation.

Dans la pratique, les capteurs d'accélération les plus répandus sont les capteurs piézo-électriques. Il en existe des exécutions très variées d'un point de vue tant mécanique qu'électrique. Le capteur d'accélération doit être choisi en fonction de son utilisation.

### II.2.3.1- Principe de mesure :

L'accéléromètre permet de mesurer les vibrations absolues des paliers d'une machine tournante. L'accéléromètre piézo-électrique est composé d'une masse sismique agissant sur un cristal de céramique. Lorsque le capteur est soumis à des vibrations, la masse sismique transmet sa force d'inertie aux cellules piézo-électriques placées entre la base du capteur et la masse. De par l'effet piézo-électrique, une charge électrique proportionnelle à la force donc à l'accélération, apparaît à la surface des cellules sensibles.

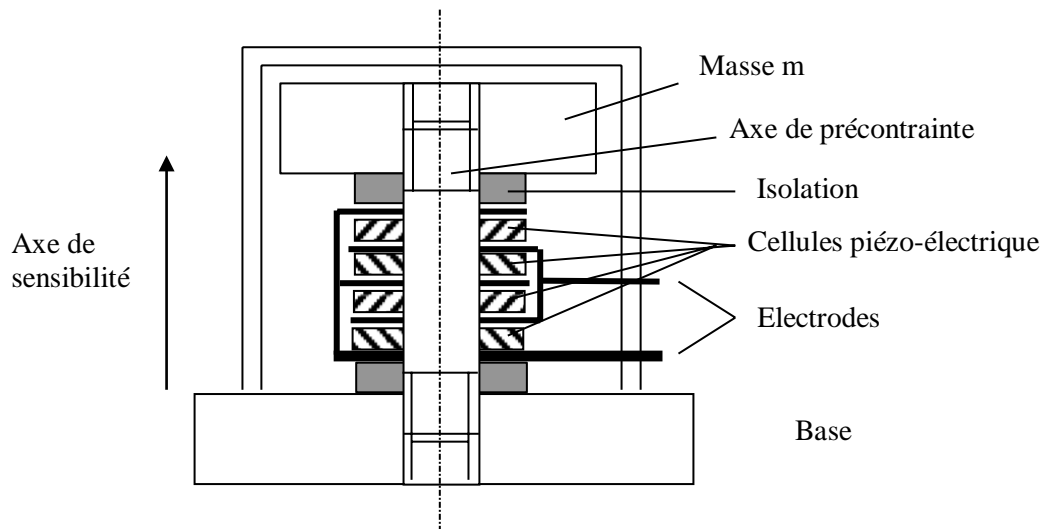


Fig II.9 : Principe de mesure

Les cellules piézo-électriques sont composées de Cristal ou la céramique de synthèse pour des températures allant jusqu'à 250°C, permet d'obtenir de hautes sensibilités, une seule cellule peut suffire pour la construction d'un accéléromètre. Par contre, si la céramique est soumise à une température supérieure à 250°C, elle perd définitivement ses propriétés piézo-électriques.

Il existe deux types de technologies pour ces capteurs :

- Mode compression : la charge électrique est proportionnelle à la force de compression.
- Mode cisaillement : la charge électrique est proportionnelle à la force de cisaillement.

Un axe de précontrainte permet d'éviter tous chocs et sert aussi de fixation mécanique. De plus, il permet la mesure des accélérations négatives.

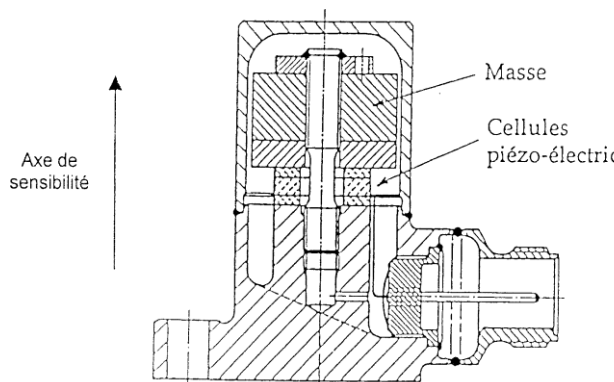


Fig II.10 : Montage en compression

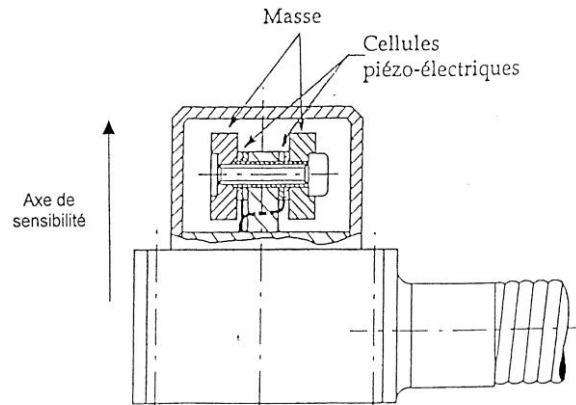


Fig II.11 : Montage en cisaillement

### II.2.3.2- Réponse en fréquence :

La réponse en fréquence représente la relation existant entre charge électrique générée et fréquence d'excitation, à accélération constante.

### II.2.3.3- Sélection :

Les principaux critères de sélection d'un accéléromètre sont :

- La gamme de fréquence
- La sensibilité
- La température

La sensibilité est liée à la fréquence : pour mesurer les hautes fréquences, la sensibilité doit être faible et pour mesurer les basses fréquences, la sensibilité doit être importante.

### II.2.3.4- Fréquence de résonance :

La plage de fréquence d'un accéléromètre est normalement définie par la plage présentant une erreur de sensibilité inférieure à 5%. En voici quelques exemples :

Paramètre	CA 201	CA 134	CA 136
Technologie	Cisaillement	Compression	Compression
Sensibilité	100pC/g	10pC/g	100pC/g
Fréquence de résonance	11 kHz	14 kHz	35 kHz
Réponse en fréquence (+/-5%)	5 à 3000 Hz	5 à 3000 Hz	5 à 6000 Hz

#### II.2.4- Le capteur de phase :



*Fig II.13 : Capteur de phase (cellule photoélectrique SCHENCK)*

Ces capteurs trouvent leur application en équilibrage, en recherche de résonances et en surveillance des machines.

Le capteur de référence de phase est une cellule photoélectrique ou un capteur sans contact qui détecte un top par tour.

Le signal fourni par le capteur de vibration est filtré à la fréquence mesurée par le capteur référence. La phase correspond à la position de la portion de la circonférence du rotor qui a défilé entre le moment où le top passe devant le capteur de référence (filtre suiveur) et le moment où la sinusoïde est à son maximum.

#### II.3- Les avantages et les désavantages des capteurs :

Vous trouverez dans le tableau ci-après les avantages et les inconvénients des différents types de capteurs de vibrations



Capteur	Propriétés et avantages	Désavantages
<b>Capteur de déplacement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sortie proportionnelle au déplacement</li> <li>- Mesure relative : pour un palier lisse, on mesure la distance entre le coussinet et l'axe, on peut donc déterminer pour les paliers, si l'axe et le coussinet se touchent.</li> <li>- Ce capteur mesure les déplacements statiques et dynamiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construction peut robuste, bobine très fragile.</li> <li>- L'alimentation de la bobine en courant alternatif s'effectue avec une alimentation externe.</li> <li>- La sortie de ce capteur est influencée par différents facteurs : rayures ou irrégularités sur la surface cible, magnétisme...</li> <li>- Gamme de fréquence limitée (maximum jusqu'à 10KHz).</li> <li>- La sensibilité est dépendante du matériau cible employé.</li> <li>- Une calibration est donc nécessaire.</li> </ul>
<b>Capteur de vitesse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sortie proportionnelle à la vitesse des vibrations</li> <li>- Aucune alimentation externe exigée pour alimenter la bobine. L'aimant suffit à créer une tension.</li> <li>- Les capteurs de vitesse sont fabriqués de manières robustes. Une chute ne changera même pas sa sensibilité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le capteur est grand et lourd, il peut être fragile.</li> <li>- Gamme de fréquence limitée : ils sont inutilisables en dessous de 10 Hz et au dessus de 1000 Hz.</li> <li>- La sortie peut être influencée par des champs magnétiques.</li> <li>- La direction de la mesure influence la sensibilité (position horizontal ou verticale).</li> <li>- Prix élevé.</li> </ul>
<b>Capteur d'accélération</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sortie proportionnelle à l'accélération des vibrations.</li> <li>- Léger et de volume réduit.</li> <li>- Bon marché.</li> <li>- Très large gamme de fréquence (1 Hz-100 KHz).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les mesures statiques ne sont pas possibles.</li> </ul>

### - Les modes de mesure des vibrations :

On en distingue dans la pratique trois modes de mesure :

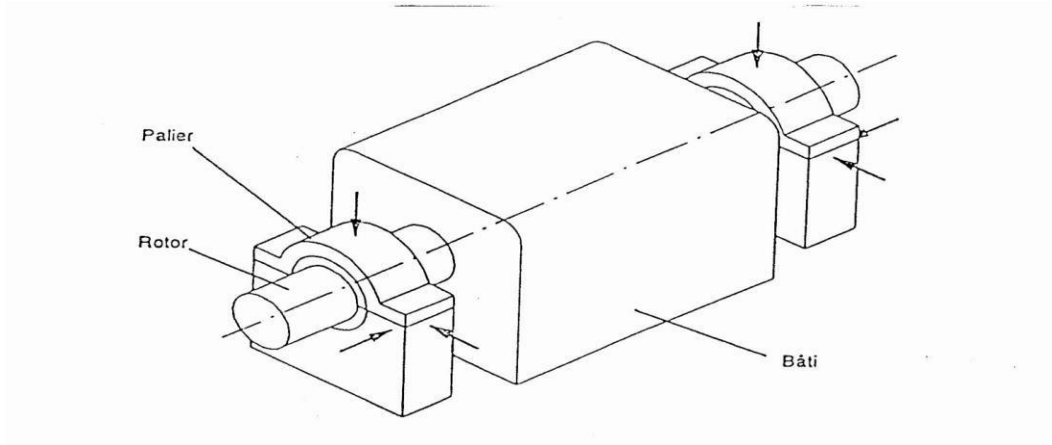
- vibrations absolues de paliers.
- vibrations relatives d'arbre.
- vibrations absolues d'arbres.

#### II.4.1- Vibrations absolues de paliers :

La vibration absolue est le mouvement vibratoire d'une partie non rotative de la machine par rapport à un espace lié à la terre. La vibration absolue se mesure au moyen de capteurs sismiques appelés accéléromètre ou vélocimètre idéalement placés sur les paliers de la machine. Bien que les vibrations ne soient pas engendrées par les paliers, ceux-ci sont les points de liaison entre le rotor, qui génère les vibrations, et le reste de la machine.

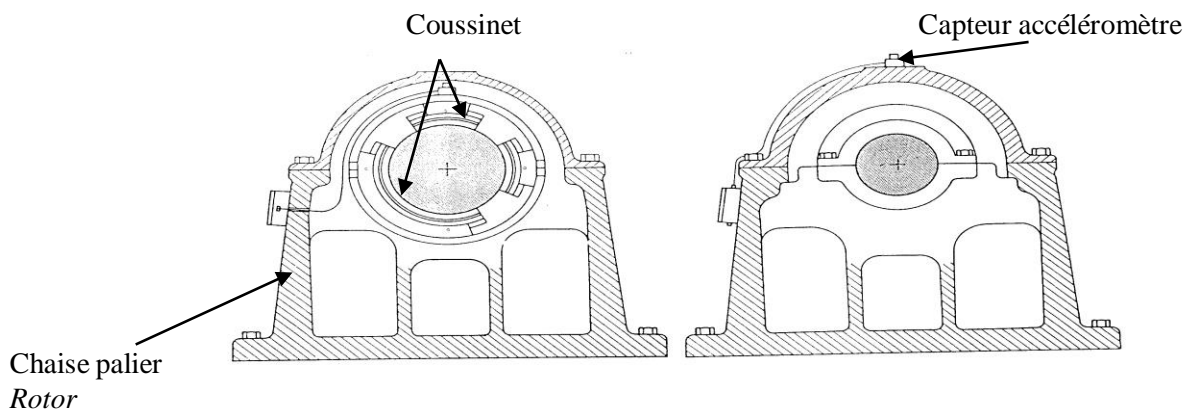
La mesure de vibrations absolues se fait principalement perpendiculairement à l'axe de rotation de l'arbre (vibration radiale = verticale et horizontale) et dans le sens de

l'axe de rotation (vibration axiale). Deux capteurs sont idéalement placés sur chaque palier selon deux axes perpendiculaires afin de pouvoir détecter le niveau maximal de vibration.



*Fig II.15 : Point de mesures recommandées*

Pour la machine de petite et moyenne taille, les capteurs de vibrations sont généralement placés sur les couvercles de paliers. Il s'agit d'une mesure des vibrations de l'enveloppe extérieure de la machine.



*Fig II.16 : Placement des accéléromètres*

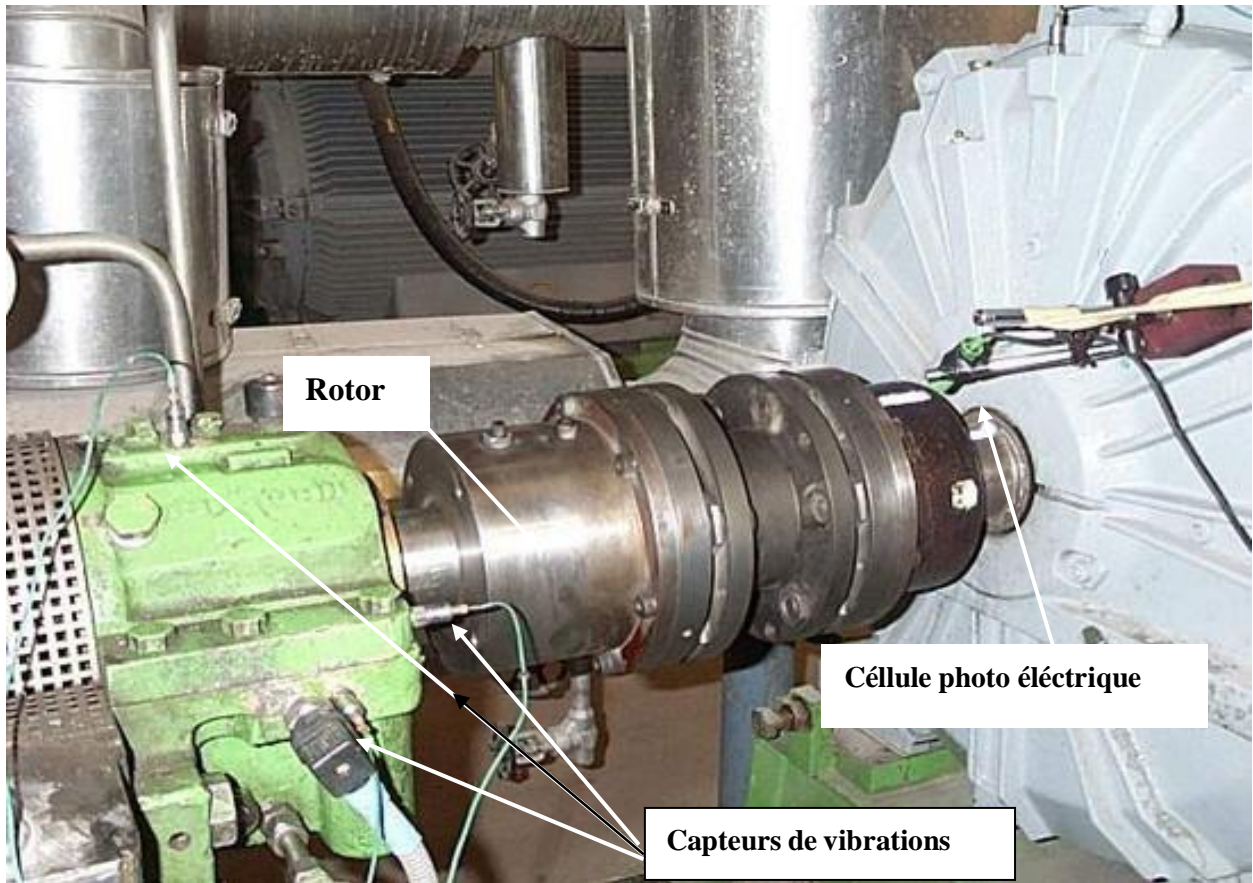


Fig II.17 : Capteurs vélocimétriques placés sur un moteur-pompe dans les trois directions

#### II.4.2- Vibration relative d'arbre:

La vibration relative est le mouvement vibratoire d'une partie rotative de la machine par rapport à une partie non rotative. La vibration relative se mesure au moyen de capteurs de proximité qui mesurent le déplacement relatif de la cible (arbre) par rapport à la tête du capteur.

Dans un environnement industriel hostile, on utilise principalement le capteur inductif à courants de Foucault car il a une excellente tenue à la température et ses mesures restent fiables même en présence d'huile, de vapeur et de poussières. Ces capteurs de proximité sont également utilisés pour mesurer d'autres paramètres tels que la position axiale et la référence de phase.

La mesure de vibration relative se fait principalement à l'axe de rotation de l'arbre (vibration radiale) et dans le sens de l'axe de rotation (vibration axiale).

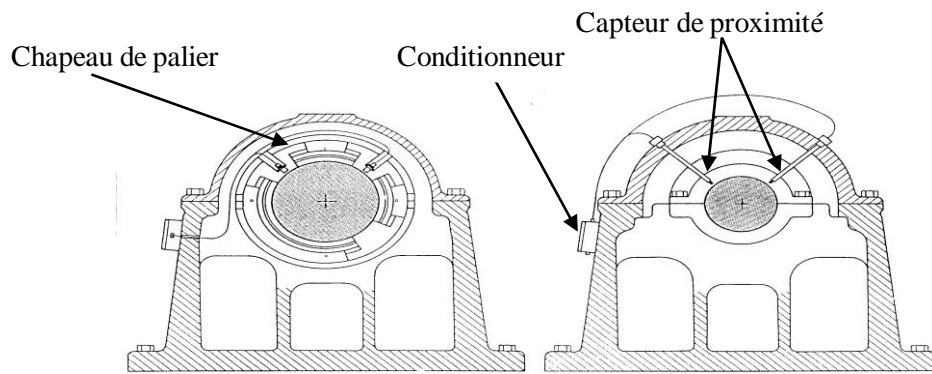


Fig II.18 : Placement des capteurs de proximité

Deux capteurs sont normalement placés à proximité de chaque palier selon deux axes perpendiculaires afin de pouvoir déceler le niveau maximal de vibration. Sur les machines à arbre horizontal, deux capteurs sont généralement disposés à  $45^\circ$  de la verticale.

Pour que la mesure de vibration relative de l'arbre donne de bons résultats, il est important que les paliers soient rigides. Si les paliers sont trop souples, le déplacement relatif devenant insignifiant, il est difficile de le mesurer.

Les paliers à roulements ne peuvent pas être surveillés par des capteurs de proximité étant donné le très faible jeu radiale des roulements. Pour les machines de grandes dimensions, les capteurs de proximité peuvent être montés directement sur les paliers, à l'intérieur des enveloppes.

#### II.4.2.1- Intérêt des mesures de vibrations d'arbre :

Pour analyser les causes des vibrations des machines tournantes, il est souvent plus utile de mesurer les vibrations de l'arbre plutôt que celles des paliers. En effet, d'une part la mesure est plus proche de la cause des vibrations (le corps tournant), d'autre part elle dépend peu des résonances éventuelles et de l'amortissement des corps fixes (paliers, structures, fondations).

On mesure souvent pour les vibrations relatives d'arbre, l'orbite cinétique qui est le déplacement du centre de gravité de l'arbre autour de l'axe de rotation.

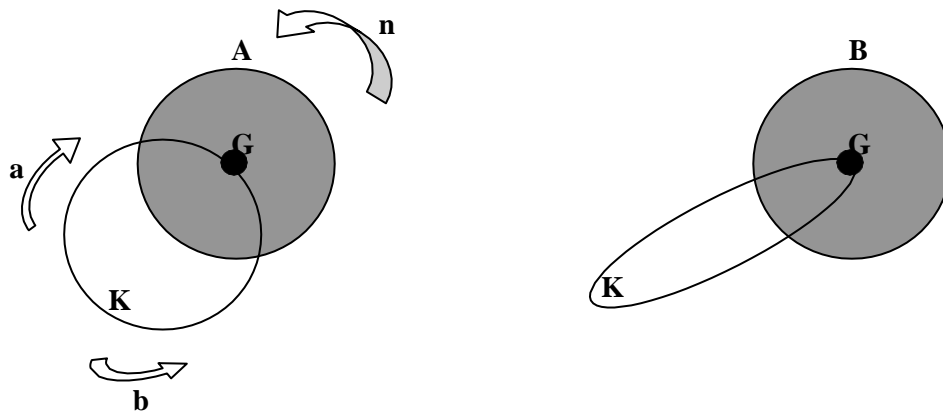


Fig II.19 : L'orbite cinétique

**A** : rotor isotrope

**n** : sens de rotation

**B** : rotor anisotrope

**a** : sens négatif

**G** : centre de gravité du rotor

**b** : sens positif

**K** : orbite cinétique

Dans le cas idéal d'un arbre isotrope ayant son balourd pour seul exciteur de vibrations, l'orbite cinétique, dans n'importe quel plan perpendiculaire à l'axe de rotation, est un cercle parfait. En règle générale, les rotors ne sont pas isotropes, c'est-à-dire qu'ils sont susceptibles de se déformer avec des amplitudes différentes selon deux directions préférentielles. Leur orbite cinétique prend alors la forme d'une ellipse.

Dans les cas extrêmes d'anisotropie, l'orbite est un segment de droite.

La dimension, la forme et la position de l'orbite cinétique varient avec la vitesse de rotation. En général, l'amplitude atteint une valeur maximale aux vitesses critiques.

Le sens de parcours de l'orbite est, dans la plupart des cas, identique au sens de rotation (sens positif). Le sens négatif se rencontre néanmoins parfois.

#### II.4.2.2- Mesure de l'orbite cinétique :

L'orbite cinétique contient toutes les informations concernant les vibrations relatives d'arbre. Afin de les recueillir complètement, on dispose de deux capteurs sans contact dans les paliers. Ces capteurs doivent être situés à 90° l'un de l'autre dans un même plan.

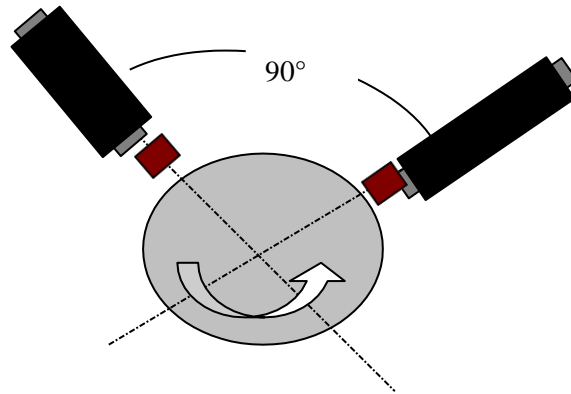
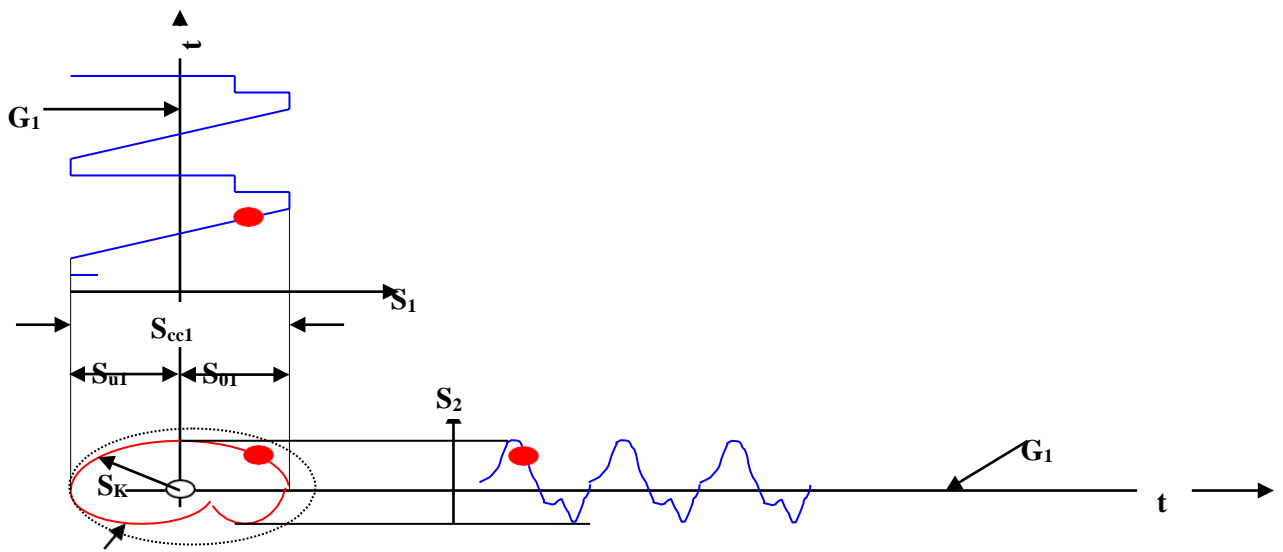


Fig II.20 : Montage typique de deux capteurs sans contact permettant de mesurer l'orbite cinétique d'un arbre dans ses paliers

Chaque capteur mesure à chaque instant  $t$  l'amplitude  $s(t)$  de la vibration dans sa direction de montage propre.

L'addition vectorielle des deux signaux donne à chaque moment la valeur instantanée de la vibration réelle et donc, sur un tour d'arbre, l'orbite cinétique.



**k** Fig II.21 : Orbite cinétique constituée à partir de deux capteurs sans contact

$$S_{\kappa}^2(t) = S_1^2(t) + S_2^2(t)$$

Des déplacements vibratoires  $S_1(t)$  et  $S_2(t)$  dans les directions 1 et 2.

Légende :

$S_1, S_2$  : valeurs instantanées

$S_{01}, S_{02}$  : valeurs maximales

$S_{u1}, S_{u2}$  : valeurs minimales

$S_{cc1}, S_{cc2}$  : valeurs crêtes à crêtes

$S_K$  : déplacement cinétique instantané

$S_{max}$  : plus grande valeur des déplacements cinétiques instantanés

$K$  : orbite cinétique

$t$  : temps

$G_1, G_2$  : axes de temps

### **II.4.3- Vibration absolue d'arbre :**

Les rotors légers tournant dans une structure très rigide et très lourde ne produisent que des vibrations de paliers faibles. Par contre, les mouvements relatifs de l'arbre par rapport aux paliers lisses sont importants. L'amplitude des vibrations relatives d'arbre est supérieure aux vibrations absolues de paliers dans un rapport variant entre 10 et 50. Dans ce cas, il conviendra donc de surveiller les vibrations relatives d'arbre.

Lorsque la masse du rotor augmente, dans une même structure, le rapport entre vibrations relatives d'arbre et vibrations absolues de palier change. Pour un groupe de 100 MW par exemple, le rapport n'est plus compris qu'entre 4 et 10. Il est toujours utile ici de mesurer les vibrations relatives d'arbre, mais il est sage aussi de surveiller les vibrations absolues de paliers. De cette manière, on peut connaître parfaitement le comportement vibratoire de la machine.

Dans le cas de très grosses machines, produisant de grandes puissances, le rapport entre la masse du rotor et celle des paliers augmente. Les vibrations absolues de palier peuvent alors devenir aussi grandes que les vibrations relatives d'arbre. Dans ce cas, on mesure de préférence les **vibrations absolues d'arbre**.

### **II.5- Conclusion :**

L'utilisation de l'analyse des signaux vibratoires comme méthode de diagnostic remonte aux années 1960. Depuis ce temps, il a été largement utilisé dans la plupart des installations industrielles, en particulier dans la prévention des pannes mécaniques.

Un rappel de certains éléments d'analyse des signaux a été abordé, tel que la transformée de Fourier, outil classique d'analyse spectral qui a prouvé son efficacité pour les signaux à caractère périodique (cas des machines tournantes).

Au stade de diagnostic, l'analyse des vibrations est l'une des meilleures méthodes, notamment pour l'étude des pannes mécaniques de machines rotatives.[2]

# ***Chapitre 03***

## ***Traitement de signal***



## III.1 - LES CONCEPTS DU TRAITEMENT DE SIGNAL

### III.1.1- Introduction et généralités sur les signaux

Le traitement du signal est la discipline qui développe et étudie les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation des signaux. Parmi les types d'opérations envisageables sur ces signaux, on peut dénoter le contrôle, le filtrage, la compression de données, la transmission de données, le débruitage, la déconvolution, la prédiction, l'identification, la classification, etc. Les signaux à traiter peuvent provenir de sources particulièrement diverses, mais la majorité sont des signaux électriques ou devenus électriques avec capteurs et transducteurs (Microphones, rétines, senseurs thermiques, optiques, de pression, de position, de vitesse, d'accélération et généralement de l'ensemble des grandeurs physiques et chimiques).

Un signal  $y$  dépend d'une variable  $x$ , sous la forme générale :

$$y=S(x)$$

Avec  $y \in \mathbb{C}^m$  et  $x \in \mathbb{C}^n$ .

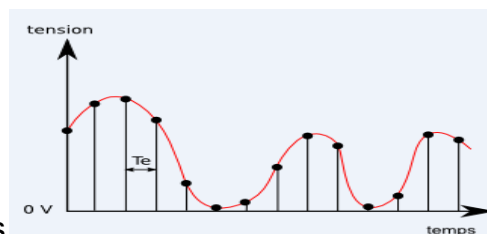
On se limitera, sauf mention contraire, au cas où  $m=1$  et  $n=1$ . Le cas le plus courant est celui où  $x$  est en fait le temps  $t$ .

#### - Les classes de signaux

##### - Temps continu et temps discret

-Dans le premier cas, le signal  $x$  est une fonction continue du temps  $t$ .

Exemple :



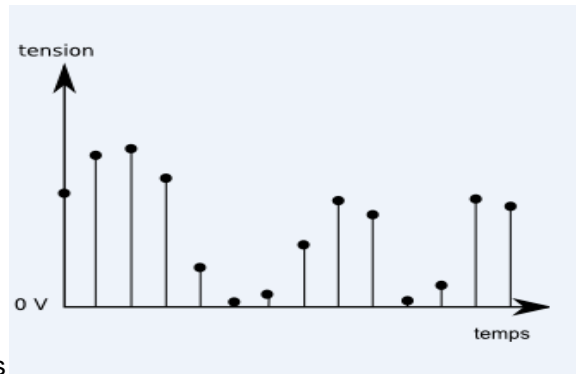
$Y(t)$ =la tension et  $x(t)$ =le temps

Fig. III.1 – Signal à temps continu

On notera souvent un tel signal sous la forme  $x(t)$ .

-Dans le deuxième,  $x$  n'est défini qu'en un ensemble dénombrable de points.

Exemple :



$Y(t)=T$  et  $x(t)=\text{le temps}$

**Fig. III.2** – Signal à temps discret

On notera souvent un tel signal sous la forme  $x(n)$ . Ces points sont souvent répartis à des intervalles de temps réguliers.

### **-Variables continues et variables discrètes**

-Dans le premier cas, le signal  $x$  peut prendre toutes les valeurs possibles dans un ensemble de définition donné. Exemple]  $-\infty; +2[$  ou  $(\mathbb{R})$ . Un tel signal est également appelé **analogique** en référence à l'électronique.

-Dans le deuxième, le signal  $x$  ne peut prendre qu'un ensemble dénombrable de valeurs. Un tel signal est également appelé **numérique** en référence à l'électronique.

Notez que les quatre combinaisons sont possibles : les figures (**Fig. III.1**, **Fig. III.2**) donnent ainsi respectivement un exemple de signal analogique à temps continu, de signal analogique à temps discret, et de signal numérique à temps continu.

### **-Signaux périodiques et signaux apériodiques**

Un signal périodique  $x(t)$  est une fonction du temps qui satisfait la condition [3]

$$x(t) = x(t + T) \text{ Pour tout } t \dots\dots\dots (1.1)$$

$T$  est une constante positive. Il est évident que si la condition est satisfaite pour  $T = T_0$ , elle est aussi satisfaite pour  $T = 2T_0$ ,  $T = 3T_0$ ;  $T = 4T_0$ .

La valeur la plus petite de  $T$  qui satisfait l'équation de définition est appelée

(période fondamentale) de  $x(t)$ .

La période fondamentale de  $T$  définit donc la durée d'un cycle complet de  $x(t)$ . L'inverse de la période fondamentale est appelé (la fréquence fondamentale) du signal périodique  $x(t)$ ; elle d'écrit combien de fois le signal périodique se reproduit par seconde.

On peut donc écrire formellement :

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (1.2)$$

La fréquence est mesurée en hertz (Hz) ou en cycles par seconde.

La fréquence angulaire (ou pulsation), mesurée en radians par seconde, est définie par

$$\omega = 2\pi f = 2\pi / T \dots\dots\dots (1.3)$$

**-Energie, puissance**

**-Définitions**

a) **Energie:** soit un signal  $x(t)$  à temps continu, tel que  $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$  existe et converge. Alors le signal est dit à *énergie finie* et la valeur de cette intégrale est appelée énergie du signal  $x$  [4,5]:

$$E_x \triangleq \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \dots\dots\dots (1.4)$$

b) **Puissance:** pour le même type de signaux, on définit également la *puissance*, notée  $P_x$  par:  $p_x \triangleq \lim_{\theta \rightarrow +\infty} 1/2\theta \int_{-\theta}^{+\theta} |x(t)|^2 dt$

**-Remarques**

1. Pour un signal périodique, l'intégrale 1.4 ne converge pas. On peut néanmoins définir la puissance d'un signal  $x$   $T$ -périodique par :

$$p_x \triangleq \frac{1}{T} \int |x(t)|^2 dt$$

2. Il existe des signaux ni périodiques, ni d'énergie finie, pour lesquels la puissance ne peut être définie, comme par exemple la "rampe"  $x(t)=t$ .

3. Il s'agit là de définitions mathématiques. En pratique, un signal mesuré ne l'est *jamais* sur un intervalle de temps infini. Par exemple, on peut commencer à visualiser un signal à un instant qu'on prendra comme origine des temps, et dans ce cas on arrêtera son examen au bout d'un temps  $T_{obs}$ . Comme on ne *sait* pas ce que ce signal était avant qu'on ne l'observe, ni ce qu'il deviendra après, il serait présomptueux d'utiliser les bornes  $-\infty$  et  $+\infty$  dans l'intégrale

1.4, et on se limitera donc à l'écrire sous la forme  $\int_0^{T_{obs}} |x(t)|^2 dt$ .

Remarquons d'ailleurs que cette dernière intégrale converge toujours.

## **-La Transformée de Fourier**

### **III.1.4.1- Généralités**

Cet outil fut introduit pour la première fois par le physicien français Joseph Fourier, pour ses travaux sur la conduction de la chaleur au XIX<sup>e</sup> siècle. Depuis lors, il a longuement été développé, et des extensions en ont été proposées. Il existe plusieurs sortes de Transformées de Fourier, chacune adaptée aux classes de signaux qu'elle analyse, ou au type de signal qu'elle génère. On dénombre ainsi :

- une transformée continue pour les signaux à temps continu : la Transformée de Fourier à proprement parler ;
- une transformée continue pour les signaux à temps discret : la Transformée de Fourier à temps discret ;
- une transformée discrète pour les signaux périodiques à temps continu: le développement en série de Fourier, ou Transformée de Fourier au sens des distributions ;
- une transformée discrète pour les signaux à temps discret : la Transformée de Fourier Discrète.

Nous allons nous limiter, pour l'établissement des propriétés, à la Transformée de Fourier continue des signaux à temps continu.

## - Définitions

a) **Transformée de Fourier:** soit un signal  $x(t)$  à temps continu, tel que  $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt$  converge. On définit alors la **transformée de Fourier** de  $x$ , notée  $X(\nu)$  ou **TF[x(t)]**, par

[5,6]:

$$X(\nu) \triangleq \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi\nu t} dt \dots\dots\dots ( 1.6)$$

Où  $j$  est tel que  $j^2 = -1$ . La transformée de Fourier permet de mesurer le "contenu fréquentiel" d'un signal, à savoir la manière dont on peut le décomposer en une somme de sinusoides de fréquences.

b) **Transformée de Fourier inverse:** si de plus  $x$  est à *énergie finie*, cette relation est inversible en [6]

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\nu) e^{j2\pi\nu t} dt \dots\dots\dots ( 1.7)$$

L'opération correspondante est appelée transformation de Fourier inverse : elle permet de revenir au signal temporel  $x$  à partir de son contenu fréquentiel.

Ces deux définitions permettent de disposer de deux manières de définir complètement un signal qui satisfait aux conditions d'irréversibilité de la transformée de Fourier. On peut le définir :

- soit par sa représentation temporelle.
- soit par sa représentation fréquentielle.

Ces deux domaines sont souvent appelés "duaux" car leurs variables  $t$  et  $f$  sont liées par

$$f = \frac{1}{t}$$

c) **Spectre :** on appelle spectre de  $x$  le **module** de la transformée de Fourier de  $x$ :

$$S(\nu) = |X(\nu)| \dots\dots\dots ( 1.8)$$

**Remarque importante :** La notation TF[x(t)] est abusive, puisqu'il faudrait plutôt écrire TF[x], l'opérateur TF s'appliquant à la fonction  $x$ , et non au réel  $x(t)$ . Elle sera néanmoins utilisée tout au long de ce cours, pour des raisons de facilité de

notation.

## - Propriétés

Pour toutes les démonstrations suivantes, les signaux  $x$  et  $y$  sont d'intégrales absolument convergentes. On notera indifféremment  $X(\nu)$  et  $TF_x(\nu)$  la transformée de Fourier du signal  $x$ .

## -Linéarité

Soient  $\lambda$  et  $\mu$  deux nombres complexes quelconques. La linéarité de l'équation 1.6 entraîne facilement que :

$$TF(\lambda x + \mu y) = \lambda TF(x) + \mu TF(y) \dots\dots\dots(1.9)$$

## - Décalage en temps/fréquence

Soit  $t_0$  un réel strictement positif. Calculons  $TF[x(t - t_0)]$  :

$$TF[x(t - t_0)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - t_0) e^{-j2\pi\nu t} dt$$

On effectue le changement de variable  $u = t - t_0$ , et il vient:

$$TF[x(t - t_0)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) e^{-j2\pi\nu(u+t_0)} du$$

D'où:

$$TF[x(t - t_0)] = e^{-j2\pi\nu t_0} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) e^{-j2\pi\nu u} du$$

et donc:

$$TF[x(t - t_0)] = e^{-j2\pi\nu t_0} X(\nu) \dots\dots\dots(1.10)$$

Par symétrie dans les relations 1.6 et 1.7, on obtient de même :

$$TF[x(t - t_0)] = e^{-j2\pi\nu t_0} X(\nu - \nu_0) \dots\dots\dots(1.11)$$

## -Dérivation

On note  $x'(t) = dx/dt$ . Alors :

$$TF[x'(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x'(t) e^{-j2\pi\nu t} dt$$

On effectue une intégration par parties en intégrant  $x'(t)$  et en dérivant

l'exponentielle complexe. On obtient alors:

$$TF[x'(t)] = [x(t)e^{-j2\pi vt}]_{-\infty}^{+\infty} + j2\pi v \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi vt} dt$$

Comme  $x$  est, physiquement, nécessairement nul à  $\pm\infty$ , et que l'exponentielle complexe  $y$  reste bornée, le premier terme de la somme devient nul et donc :

$$TF[x'(t)] = j2\pi v X(v) \dots\dots\dots(1.12)$$

### -Dilatation en temps/fréquence

Soit  $\lambda$  un réel non nul. Calculons  $TF[x(\lambda t)]$ :

$$TF[x(\lambda t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\lambda t) e^{-j2\pi vt} dt$$

Effectuons le changement de variable  $u = \lambda t$ . Deux cas se présentent alors :

-Soit  $\lambda > 0$ ; alors

$$TF[x(\lambda t)] = \frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) e^{-j2\pi \frac{v}{\lambda} u} du$$

donc

$$TF[x(\lambda t)] = \frac{1}{\lambda} X\left(\frac{v}{\lambda}\right) \text{ avec } \lambda > 0 \dots\dots\dots(1.13)$$

-Soit  $\lambda < 0$ ; alors

$$TF[x(\lambda t)] = \frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) e^{-j2\pi \frac{v}{\lambda} u} du = -\frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) e^{-j2\pi \frac{v}{\lambda} u} du$$

et donc

$$TF[x(\lambda t)] = \frac{1}{\lambda} X\left(\frac{v}{\lambda}\right) \text{ avec } \lambda < 0 \dots\dots\dots(1.14)$$

**Remarque** : si on applique la formule 1.14 en posant  $\lambda = -1$ , on obtient

$TF[x(-t)] = X(-v)$ . On en déduit donc que la parité de la Transformée de Fourier est la même que celle du signal original.

### - Conjugaison complexe

On note  $x^*$  le signal conjugué de  $x$ . Calculons  $TF[x^*(t)]$ :

$$TFx^*(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(t)e^{-j2\pi vt} dt = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{j2\pi vt} dt \right)^*$$

et donc :

$$TF[x^*(t)] = X^*(-v) \dots\dots\dots(1.15)$$

**Remarque :** Si  $x$  est un signal réel, alors  $x(t) = x^*(t)$ , donc :

$$X(v) = X^*(-v)$$

Si de plus  $x$  est pair (ou impair), alors  $x(t) = x(-t)$  (respectivement  $x(t) = -x(-t)$ ), il vient  $X^*(-v) = X^*(v)$  (respectivement  $X^*(-v) = -X^*(v)$ ), d'où  $X(v) = X^*(v)$  et  $X$  est réelle (respectivement imaginaire pure). En définitive, on obtient le tableau récapitulatif suivant :

Signal $x$	Pair	Impair
Réel	$X$ réelle paire	$X$ imaginaire pure Impaire
Imaginaire	$X$ imaginaire pure paire	$X$ réelle impaire

**Tab. III.1 :** tableau récapitulatif des signaux Pair et Impair

### -Convolution de deux signaux

**Définition :** Soit  $x(t)$  et  $y(t)$  deux signaux de la variable réelle  $t$ . On appelle produit de convolution ou convolution de  $x(t)$  par  $y(t)$  l'opération notée  $(x * y)(t)$  (on note plus souvent, mais de façon impropre  $x(t) * y(t)$ ) et définie par [7,8] [5,6]:

$$(x * y)(t) \triangleq \int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)y(t - \theta)d\theta \dots\dots\dots(1.16)$$

On vérifie aisément que  $(x * y)(t) = (y * x)(t)$ , c'est-à-dire que la convolution est commutative, par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)y(t - \theta)d\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \theta)y(\theta)d\theta \dots\dots\dots(1.17)$$

**Transformée de Fourier :** calculons  $TF[(x * y)(t)]$  :

$$TF[(x * y)(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)y(t - \theta)d\theta \right) e^{-j2\pi vt} dt$$

Ou :



$$TF[(x * y)(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta)y(t - \theta) e^{-j2\pi vt} d\theta dt$$

On écrit  $e^{-j2\pi vt} = e^{-j2\pi v(t-\theta)} e^{-j2\pi v\theta}$ ; et on obtient, en regroupant :

$$TF[(x * y)(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} y(t - \theta) e^{-j2\pi v(t-\theta)} dt \right) x(\theta) e^{-j2\pi v\theta} d\theta$$

Dans l'intégrale centrale, on effectue le changement de variable  $u = t - \theta$ ; il vient alors :

$$TF[(x * y)(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} y(u) e^{-j2\pi v(u)} du \right) x(\theta) e^{-j2\pi v\theta} d\theta$$

On peut ensuite séparer les variables, et on obtient :

$$TF[(x * y)(t)] = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} y(u) e^{-j2\pi v(u)} du \right) \left( \int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta) e^{-j2\pi v\theta} d\theta \right)$$

Et donc :

$$TF[(x * y)(t)] = X(v)Y(v) \dots\dots\dots (1.18)$$

Par symétrie dans les relations 1.6 et 1.7, on obtient de même :

$$TF[(x \cdot y)(t)] = (X * Y)(v) \dots\dots\dots (1.19)$$

**La transformée de Fourier de la convolution de deux signaux est le produit de leurs transformées de Fourier, et la transformée de Fourier inverse d'une convolution de deux TF est le produit des deux transformées de Fourier inverses.**

**- Représentation de Fourier des signaux d'énergie infinie**

Les signaux d'énergie infinie sont ceux pour lesquels l'intégrale 1.4 ne converge pas.

**-Impulsion de Dirac**

**Définition :** on introduit  $\delta(t)$ , noté *impulsion de Dirac* (ou pic de Dirac), défini par sa transformée de Fourier, tel que [4]:

$$TF[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \dots\dots\dots (1.20)$$

**Propriétés :** soit  $x$  un signal à temps continu, d'énergie finie.

1. Calculons  $TF[x(t)\delta(t)]$  : il s'agit de la transformée de Fourier d'un produit, donc en appliquant la formule 1.19, le résultat est la convolution des deux transformées de Fourier :

$$TFx(t)\delta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v)1(v-v')dv' = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v')dv'$$

On écrit,  $1 = e^{+j2\pi v'0}$  et on obtient :

$$TFx(t)\delta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v')e^{j2\pi v'0}dv'$$

Or le membre de droite n'est autre que la valeur prise par  $x(t)$  en  $t = 0$ . IL vient donc:

$$TF[x(t)\delta(t)](v) = x(0) \dots\dots\dots (1.21)$$

En particulier, pour  $v=0$ , on obtient facilement :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\delta(t)dt = x(0) \dots\dots\dots(1.22)$$

En généralisant, on obtient également facilement par un changement de variable :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\delta(t-t_0)dt = x(t_0) \dots\dots\dots(1.23)$$

2. Calculons également  $(x * \delta)(t)$  :

$$(x * \delta)(t) = TF^{-1}[TF(x * \delta)] = TF^{-1}[X(v).1] = TF^{-1}[X(v)] = x$$

L'impulsion de Dirac est donc l'élément neutre de la convolution.

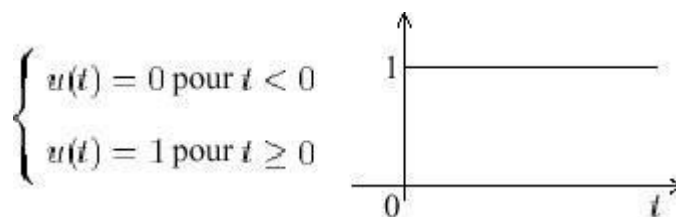
3. La définition 1.20 se traduit par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi vt}dv = \delta(t)$$

mais également par symétrie entre les relations 1.6 et 1.7, par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi vt}dv = \delta(v) \dots\dots\dots (1.24)$$

4. Impulsion de Dirac et échelon de Heaviside. L'échelon de Heaviside est défini par :



Soient  $a$  et  $b$  deux réels non nuls,  $b > a$ . Calculons  $I = \int_a^b u'(t)x(t)dt$  :

$$\int_a^b u'(t)x(t)dt = [u(t)x(t)]_a^b - \int_a^b u(t)x'(t)dt$$

en utilisant une intégration par parties.

Trois cas se présentent alors:

1.  $a > 0$  et  $b > 0$  : alors  $u(b) = u(a) = 1$ , et

$$I = u(b)x(b) - u(a)x(a) - [x(b) - x(a)] = 0$$

2.  $a < 0$  et  $b < 0$  : alors  $u(b) = u(a) = 0$ , et

$$I = 0 - 0 + \int_a^b 0 * x(t)dt = 0$$

3.  $a < 0$  et  $b > 0$  : alors  $u(b) = 1$  et  $u(a) = 0$ , et

$$I = x(b) - \int_a^b x(t)dt = x(b) - [x(b) - x(0)] = x(0)$$

4. Cette relation devant être vérifiée quels que soient  $a$  et  $b$ , on obtient :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u'(t)x(t)dt = x(0)$$

En comparant avec la relation 1.22, et ces égalités devant être vérifiées quel que soit le signal  $x$ , il vient donc que

$$u'(t) = \delta(t) \dots\dots\dots (1.25)$$

**La dérivée de l'échelon de Heaviside est l'impulsion de Dirac.**

**- Spectre des signaux périodiques :**

Soit  $x(t)$  un signal à temps continu, de période  $T$ . On admet que  $x(t)$  est "développable en série de Fourier" sous la forme :

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{N}} x_n e^{j2\pi n \frac{t}{T}} \dots\dots\dots (1.26)$$

avec

$$x_n = \frac{1}{T} \int x(t) e^{-j2\pi n \frac{t}{T}} dt \dots\dots\dots (1.27)$$

Pour un signal  $x$  impair, son développement en série de Fourier se simplifie en

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{N}} a_n \sin(2\pi n \frac{t}{T})$$

Si  $x$  est pair, on peut de même écrire

$$x(t) = \sum_{n \in \mathbb{N}} a_n \cos(2\pi n \frac{t}{T})$$

Dans les deux cas, le coefficient  $a_1$  est " l'amplitude du fondamental" et pour  $n > 1$  les coefficients  $a_n$  sont les amplitudes des "harmoniques". On peut alors définir le "taux d'harmoniques"  $r$  par :

$$r = \frac{a_1}{\sum_{n>1} a_n}$$

Calculons la transformée de Fourier de  $x$  :

$$X(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi\nu t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} (\sum_{n \in \mathbb{Z}} x_n e^{2\pi n \frac{t}{T}}) e^{-j2\pi\nu t} dt$$

En admettant la validité de la permutation des symboles de somme et d'intégration, on obtient:

$$X(\nu) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x_n (\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi n \frac{t}{T}} e^{-j2\pi\nu t} dt) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x_n (\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi(\frac{n}{T} - \nu)t} dt)$$

Or la relation 1.24 donne  $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi(\frac{n}{T} - \nu)t} dt = \delta(\nu - \frac{n}{T})$  donc :

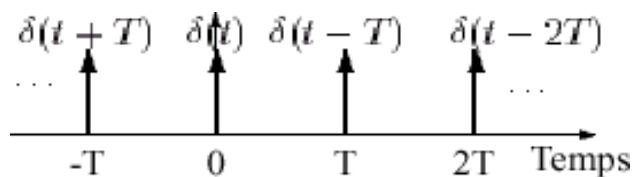
$$X(\nu) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} x_n \delta(\nu - \frac{n}{T}) \dots\dots\dots (1.28)$$

**- Cas particulier : peigne de Dirac**

**Définition :** on définit le *peigne de Dirac* de période par la relation suivante [4]:

$$\delta_T(t) \triangleq \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta(t - nT) \dots\dots\dots (1.29)$$

Il se représente graphiquement comme suit :



**Propriété :** le peigne de Dirac est un signal périodique, de période «  $T$  » il est donc "développable en série de Fourier" :

$$\delta_T(t) \triangleq \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta_n e^{j2\pi n \frac{t}{T}}$$

Chacun des coefficients  $\delta_n$  vaut en vertu de la formule 1.27 :

$$\delta_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} \delta(t) e^{-j2\pi n \frac{t}{T}} dt$$

soit :

$$\delta_n(t) = \frac{1}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} \delta_T(t - nT) e^{-j2\pi n t} dt$$

Dans cette somme infinie, seul le terme pour  $n=0$  est non nul (les autres " $\delta(t - nT)$ " sont nuls sur l'intervalle  $[-T/2; +T/2]$ ). Il vient donc :

$$\delta_n(t) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} \delta_T(t) e^{-j2\pi n t} dt$$

Et en utilisant la formule 1.22 il vient

$$\delta_{n=1} = \frac{1}{T}$$

En notant  $\Delta_T(\nu)$  la transformée de Fourier du peigne  $\delta_T$ , il vient donc :

$$\delta_T(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta_T(\nu) e^{j2\pi \nu t} d\nu = \frac{1}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \delta\left(\nu - \frac{n}{T}\right) e^{j2\pi \nu t} d\nu \right)$$

On peut alors retenir le résultat suivant :

**La transformée de Fourier d'un peigne de Dirac (en temps) est un peigne de Dirac (en fréquence).**

**Corollaire :** Autre formule du peigne de Dirac.

Utilisons la relation 1.7 de la transformée de Fourier inverse :

$$\delta_T(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta_T(\nu) e^{j2\pi \nu t} d\nu = \frac{1}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \delta\left(\nu - \frac{n}{T}\right) e^{j2\pi \nu t} d\nu \right)$$

On applique alors la propriété 1.24, et il vient :

$$\delta_T(t) = \frac{1}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{j2\pi \frac{n}{T} t}$$

## - Notion de filtre linéaire

### Linéarité:

Un système fait subir une transformation à un signal d'entrée  $x(t)$  et délivre un signal de sortie  $y(t)$ .

On appelle filtre, d'entrée  $x(t)$  et sortie  $y(t)$ , un système défini par [9]:

- Si on est à temps continu :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \theta)x(\theta)d\theta \dots \dots \dots (1.30)$$

- Si on est à temps discret :

$$y(n) = \sum_{m \in \mathbb{Z}} h(n, m)x(m)$$

**h**, Réponse impulsionnelle du système. En effet, en étudiant la réponse du système à une impulsion, dans le cas par exemple de signaux à temps continu, avec par exemple une impulsion retardée d'un temps  $rx(t) = \delta(t - r)$ , on obtient facilement en utilisant la formule 1.23 :

$$y(t, r) = h(t, r)$$

A priori, la réponse du système dépend donc du moment de l'excitation.

Par la suite, on se limitera une fois encore aux signaux à temps continu pour l'établissement des équations.

**- Invariance**

Comme il a été souligné dans le paragraphe précédent, la réponse du système dépend *a priori* de l'instant où il est excité. L'invariance est la traduction du fait que l'on désire que cette réponse ne dépende plus de cet instant. Autrement dit, si  $y(t)$  est la réponse au signal  $x(t)$ , alors que si l'entrée  $x(t)$  est retardée de  $r$ , la sortie a aussi un retard [10], le signal  $x(t - r)$  doit entraîner la réponse  $y(t - r)$ .

Soit donc le signal  $x_1(t)$  ; son image par le système S est le signal  $y_1(t)$ . On considère le signal  $x_2(t) = x_1(t - r)$  (il s'agit du signal  $x_1$  retardé du temps  $\tau$ ) ; son image est le signal  $y_2(t)$ . On cherche à avoir  $y_2(t) = y_1(t - r)$ . Traduisons cette égalité en utilisant la relation 1.30 :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \theta)x_2(\theta)d\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - r, \theta)x_1(\theta)d\theta$$

Soit :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \theta)x_1(\theta - r)d\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - r, u)x_1(u)du$$

On effectue dans la première intégrale le changement de variable  $u = \theta - r$  ; il vient alors :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(t.u + r)x_1(u)du = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - r.u)x_1(u)du$$

Cette égalité devant être vérifiée quel que soit le signal  $x_1(t)$ , on a donc nécessairement, quels que soient  $t, r, u$  :

$$h(t.r + u) = h(t - r.u)$$

En particulier, pour  $u=0$ , on obtient :

$$h(t.r) = h(t - r.0)$$

La fonction de *deux* variables  $h(t, \theta)$  peut donc se mettre sous la forme d'une fonction de la *différence* de ces deux variables. Par la suite, pour un système linéaire invariant, nous écrirons donc plus simplement  $h(t,\theta) = h(t-\theta)$ . En remplaçant dans l'équation 1.30, on obtient:

$S$  est un système linéaire invariant

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \theta)x(\theta)d\theta \dots\dots\dots (1.31)$$

Soit, plus simplement, en comparant avec la relation 1.16 :

$$S \text{ est un système linéaire invariant } \Leftrightarrow y(t) = (h * x)(t)$$

La réponse d'un système linéaire invariant à une entrée quelconque est la *convolution* de cette entrée par la réponse impulsionnelle du système.

### - Fonction de transfert

Soit  $S$  un système linéaire invariant, et  $h$  sa réponse impulsionnelle. Appliquons à l'entrée de  $S$  le signal  $x(t) = x_0e^{st}$ , avec  $s \in \mathbb{C}$ . En utilisant la relation 1.31, il vient :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \theta)x_0e^{j\theta}d\theta$$

Soit encore, en utilisant la commutativité de la convolution, formule 1.17 :

$$y(t) = x_0 \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta)e^{j(t-\theta)}d\theta$$

On peut alors "sortir"  $e^{st}$  de l'intégrale :

$$y(t) = x_0 e^{jt} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta) e^{-j\theta} d\theta$$

Le premier terme du produit est en fait  $x(t)$ . Le deuxième terme du produit ne dépend pas du temps, mais seulement de la variable  $s$ . Pour les mathématiciens, ces deux remarques se traduisent par la constatation que les signaux de la forme  $e^{st}$  sont des *signaux propres* du système  $S$ . On note le deuxième terme  $H(s)$  :

$$H(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta) e^{-j\theta} d\theta$$

$H(s)$  est appelée fonction de transfert de  $S$ . Dans le cas particulier où  $s = j2\pi\nu$ , on reconnaît dans l'expression précédente la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle  $h$ , et on parle alors de la *fonction de transfert en régime harmonique*.

**La fonction de transfert en régime harmonique est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle, soit :**

$$H(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta) e^{-j2\pi\nu\theta} d\theta \dots\dots\dots (1.32)$$

**Fonction de transfert et représentation complexe :** On a démontré que pour un système linéaire invariant  $S$ , de fonction de transfert  $H(s)$  dans le cas où l'entrée était de la forme  $x(t) = x_0 e^{st}$ , on avait la relation suivante entre l'entrée  $x$  et la sortie  $y$  :  $y(t) = H(s)x(t)$ .

Lorsque l'on utilise la représentation complexe, en écrivant  $x_0 e^{j\omega t}$ , la relation qui apparaît lie directement les représentations complexes de l'entrée et de la sortie, et la fonction de transfert en régime harmonique :

$$y(t) = y_0 e^{j\omega t} = x_0 e^{j\omega t} H(j\omega) = x(t) H(j\omega)$$

### III.2 - Conclusion :

Le traitement de signal est la discipline qui développe et étudie les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation des signaux. Parmi les types d'opérations possibles sur ces signaux, on peut dénoter le contrôle, le filtrage, la compression et la transmission de données, la réduction du bruit, etc. [13]

Bien que cette discipline trouve son origine dans les sciences de l'ingénieur (particulièrement l'électronique et l'automatisme), elle fait aujourd'hui largement



appel à de nombreux domaines des mathématiques, comme la théorie de signal, les processus stochastiques, les espaces vectoriels et l'algèbre linéaire et des mathématiques appliquées, notamment la théorie de l'information, l'optimisation ou encore l'analyse numérique.

# ***Chapitre 04***

## ***Analyse de défauts***

## IV.1- Introduction

Très souvent, les défauts mécaniques des machines tournantes se traduisent par un comportement vibratoire spécifique. L'analyse du signal vibratoire permet d'identifier la nature du défaut. Les défauts typiques usuels facilement identifiables sont :

- Le balourd.
- Les défauts d'alignement et d'accouplement.
- Les dégradations de palier et d'engrènement.[1]

## IV.2- Origines de vibration :

### IV.2.1- Les sources d'excitation :

Les sources d'excitation vibratoires dans les machines tournantes peuvent être classées en différentes catégories :

- forces périodiques (balourd)
- forces transitoires (vibration de charge)
- forces impulsionnelle (chocs)
- forces aléatoires (frottements)



### IV.2.2- Le balourd mécanique :

#### IV.2.2.1- Définition :

Le phénomène de balourd mécaniques est lié à une répartition non homogène de la masse autour de l'axe de rotation ; l'axe d'inertie de l'arbre n'est pas confondu avec l'axe de rotation.

Différentes types de balourd peuvent être identifiés :

#### - Balourd statique :

L'axe d'inertie de l'arbre est parallèle à l'axe de rotation.

#### - Balourd de couple :

L'axe d'inertie n'est plus colinéaire à l'axe de rotation, les deux axes formant un angle.

#### -Balourd dynamique :

Il s'agit d'une combinaison des deux premiers et correspond au cas le plus courant.

### **IV.2.2.2- Typologie de balourd :**

Le balourd se manifeste par une énergie vibratoire localisée :

- A la fréquence de rotation  $f_0$
- Aux fréquences des harmoniques  $2f_0, 3f_0, \dots$

Il existe toujours un balourd résiduel sur une machine tournante.

L'évolution du balourd se manifeste par une augmentation de la raie à  $f_0$  et des harmoniques  $2f_0, 3f_0, \dots$

### **IV.2.2.3- Ambiguïtés de diagnostic :**

D'autres phénomènes sont susceptibles de générer de l'énergie à la fréquence de rotation  $f_0$  sans pour autant être liés à un déséquilibre de la masse :

- Jeux de paliers trop importants
- Choc périodiques à la rotation (problème de fixation)
- Défaut rotorique dans un moteur asynchrone (barres, anneau)
- Déformation d'un rotor (effet thermique)
- Résonance de structure

Les problèmes vibratoires engendrés par ce type de défaut ne seront donc pas corrigés par l'équilibrage de la machine.

### **IV.2.3- Le délignage :**

Le défaut de lignage est dû à la non coïncidence des axes de rotation de deux machines accouplées. Selon les positions géométriques des deux axes, on distingue trois types de délignage :

#### **- Délignage parallèle:**

Défaut de concentricité des deux arbres.

#### **- Délignage angulaire:**

Défaut de parallélisme des deux arbres.

#### **- Délignage angulaire et parallèle:**

Combinaison des deux précédents.

### **IV.2.3.1- Les conséquences du délignage :**

Le défaut de lignage crée des contraintes internes au niveau des arbres et des paliers des machines accouplées. La contrainte exercée au niveau du palier génère une non-linéarité de raideur de ce dernier. Le déplacement occasionné par la force excitatrice s'en trouve écarté, entraînant l'apparition de composantes harmoniques de la fréquence de rotation.

### IV.2.3.2- Typologie du délignage :

Il se manifeste par une énergie vibratoire localisée à  $2f_0$ ,  $3f_0$  ou  $4f_0$  dans toutes les directions de mesurages.

L'évolution du défaut de lignage entraîne l'augmentation des raies caractéristiques.

#### - Spectres superposés:

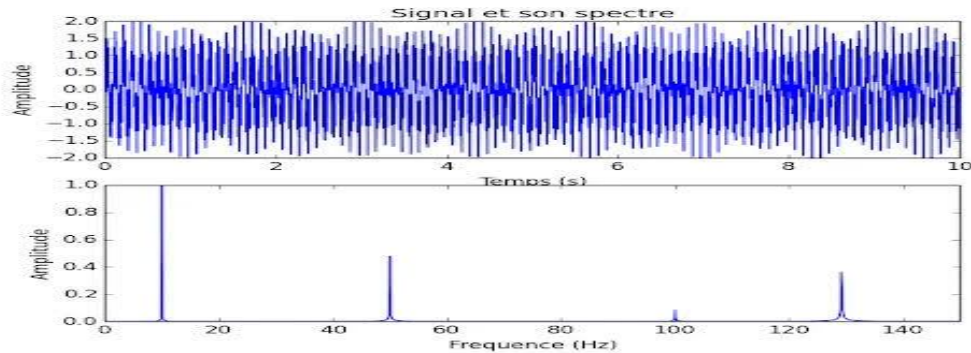


Fig. VI 01 .L'évolution du défaut de lignage  
 $Y(t)$ =amplitude et  $x(t)$ =T et F

### IV.2.3.3- Origines du délignage:

Le défaut de lignage peut n'apparaître qu'en fonctionnement, sous l'effet de la charge. Les causes peuvent être :

- Déformation du stator
- Efforts dissymétriques sur le rotor
- Calage du rotor (machines à paliers lisses)
- Déformation de la structure porteuse
- Blocage d'accouplement

### IV.2.3.4- Ambiguïtés de diagnostic:

D'autres phénomènes peuvent donner lieu à des manifestations vibratoires similaires :

- Balourd important
- Chocs périodiques à la fréquence de rotation

### IV.2.4- Les chocs périodiques:

Les chocs périodiques peuvent être internes ou externes à la machine :

\* origine des chocs périodiques externes :

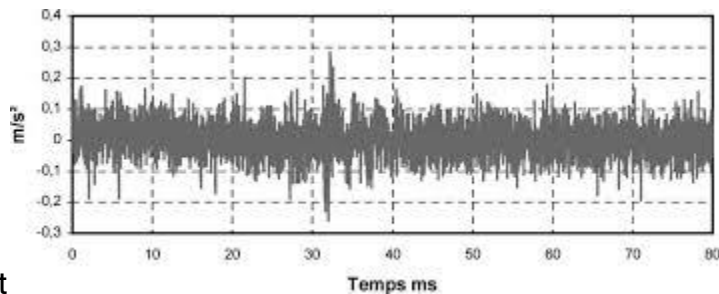
- Défaut de fixation
- D'une autre machine (presse, alternative,...)

\* origine des chocs périodiques internes :

- Dégradation de roulement
- Dégradation d'engrènement
- Jeux excessifs

#### IV.2.4.1 – Typologie des chocs périodiques:

La manifestation spectrale d'un phénomène de chocs périodiques est un peigne de raies.



$$Y(t)=g \text{ et } x(t)=t$$

Fig. VI 02 Phénomène de chocs périodiques

#### IV.2.4.2- Ambiguïtés du diagnostic :

Un peigne de raies peut être généré par des phénomènes autres que les chocs périodiques :

- Balourd important
- Fort délignage
- Phénomènes de modulation
- Amplification par une résonance

La détermination de l'origine exacte de l'allure du spectre constatée (peigne de raies) est souvent délicate.

#### IV.3- Les appareils de mesures :

On distingue fondamentalement deux types de surveillance :

- surveillance on-line.
- surveillance off-line.

La surveillance peut on outre être continue ou périodique.

Le type de surveillance à appliquer à une machine dépend plusieurs critères parmi lesquels :

- la criticité de la machine dans le process.
- La maintenabilité de la machine.
- Les conséquences d'une panne en termes de sécurité.
- la stratégie de l'entreprise.

### IV.3.1- La surveillance on-line:

Les capteurs sont installés à demeure sur les machines et connectés à un système de surveillance.

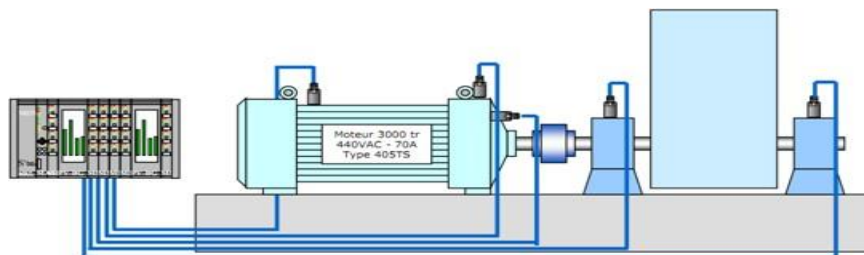


Fig. VI 03 Les capteurs sont installés sur les machines

Les systèmes on-line désignent les systèmes d'acquisitions installés à demeure sur les machines. Ils permettent la surveillance en continu des paramètres et donc la réalisation de fonction sécurité.[11]

### IV.3.2- La surveillance off-line:

Les mesures sont relevées à intervalles réguliers par un opérateur équipé d'un collecteur de données.

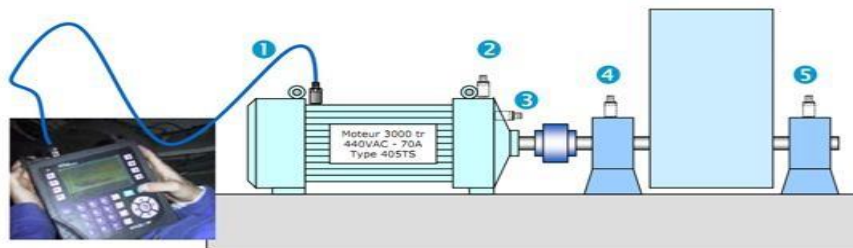


Fig. VI 04 Les mesures off-line

Les systèmes off-line désignent les systèmes d'acquisition portable permettant les relevés périodiques sur les machines et donc la réalisation de la fonction maintenance. Ils permettent généralement de réaliser également des diagnostics ponctuels.[11]

### IV.3.3- Les fonctionnalités des appareils de surveillance:

Les appareils de mesures, on-line ou off-line réalisent les fonctions suivantes :

- Conditionnement des capteurs : alimentation, surveillance de la ligne, filtrage.
- Filtrage (analogique et/ou numérique).
- Amplification.
- Numérisation.
- Stockage.

- Traitement spécifiques : integration, FFT, calcul d'énergie, détection crête.
- Comparaison à des seuils pré-définis pour émission d'alarmes (système on-line).

#### IV.3.4- Couplage des appareils:

L'ensemble des données vibratoires et process peuvent être archivées, traitées et affichées grâce à des logiciels d'application spécifiques.

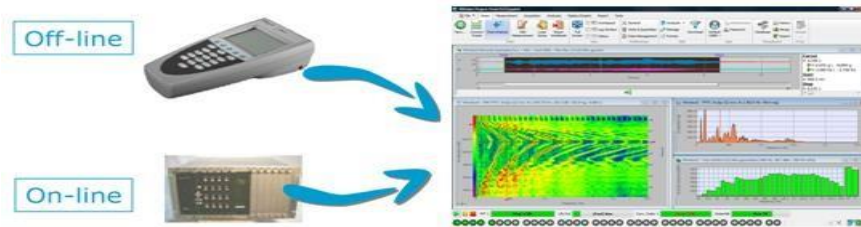


Fig. VI 05 Couplage des appareils

#### IV.3.5- Les paramètres de surveillances:

Les paramètres de surveillances sont définis au niveau de la base de données. Ils fixes :

- Les caractéristiques du signal à mesurer : capteur, grandeur mesurée , type de détection
- La format de l'accision : temporel , spectre, ordre, enveloppe
- Les caractéristiques de l'aquisition : fréquence, taille du bloc, fenêtrage
- La nature et les caractéristiques des informations extraites des aquisitions : amplitude maxi, moyenne, amplitude à une fréquence donnée, traitement du signal spécifique

#### IV.3.6- Périodicité des mesures:

La périodicité des mesures est definie selon plusieurs paramètres :

- Les types de défaillances de la machine.
- La criticité de la machine au sein du process.
- Les budgets en maintenance.



Fig. VI 06 La périodicité des mesures



#### IV.4- Mesure d'alignement de la turbine :



Désaccouplement

mesure axiale

##### - Coté Alternateur :

Position	1 <sup>er</sup> Mesure	2 <sup>eme</sup> Mesure	3 <sup>eme</sup> Mesure	4 <sup>eme</sup> Mesure	Moyenne
0°	2,23	2,20	2,17	2,21	<b>2,193</b>
90°	2,24	2,26	2,20	2,23	<b>2,223</b>
180°	2,3	2,3	2,24	2,24	<b>2,27</b>
270°	2,31	2,25	2,21	2,245	<b>2,235</b>

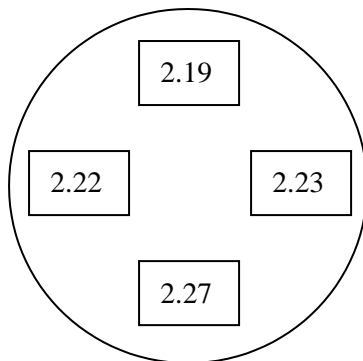


Tableau IV.1 Etat du couplement coté alternateur

##### - Coté Turbine :

Position	1 <sup>er</sup> Mesure	2 <sup>eme</sup> Mesure	3 <sup>eme</sup> Mesure	4 <sup>eme</sup> Mesure	Moyenne
0°	2,140	2,150	2,170	2,200	<b>1,183</b>
90°	2,004	2,005	2,030	2,030	<b>2,016</b>
180°	1,894	1,905	1,900	1,910	<b>1,902</b>
270°	2,030	2,050	2,040	2,050	<b>2,05</b>

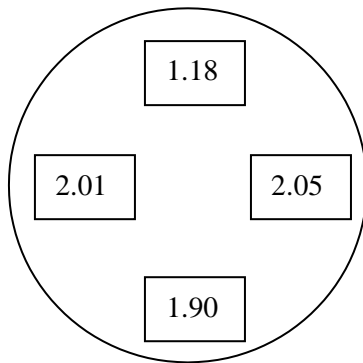
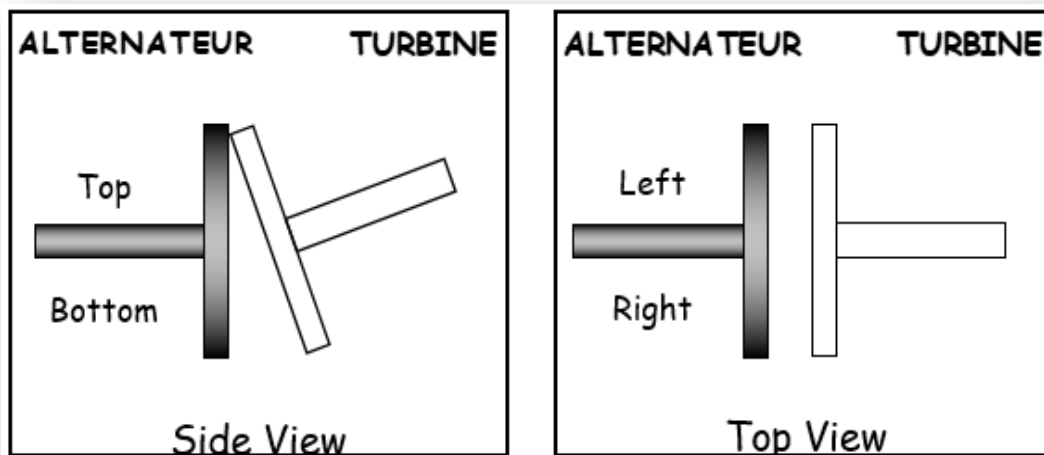


Tableau IV.2 Etat du couplement coté turbine



#### IV.4.1- Analyse spectral de la vibration du signal mesuré côté excitatrice :



Fig VI.07 Accelerometre



Fig VI.08 proximetre

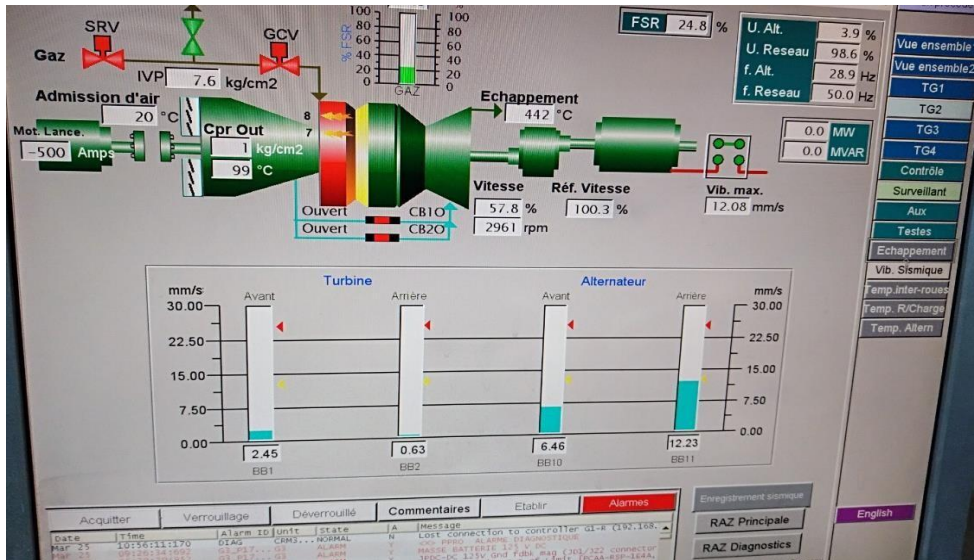


Fig VI.09 Alarm annoncée sur IHM palier alternateur côté excitatrice

On a utilisé analyseur vibroport 41 pour extraire le signal temporel du rack VM600, puis on a actionné le bouton FFT pour l'affichage du spectre.



Fig IV.10 La valise schenk exploiter pour la mesure

#### IV.4.2- Reconnaissance des défauts :

Il s'agit principalement d'un défaut angulaire, l'amplitude des composantes axiales est supérieur aux composantes radiales correspondantes.

Les défauts d'alignement vont générer une vibration due à la force de flexion de l'arbre du rotor. A chaque rotation, l'effort de flexion atteindra deux fois sa valeur maximale : une fois dans le sens positif puis une fois dans le sens négatif.

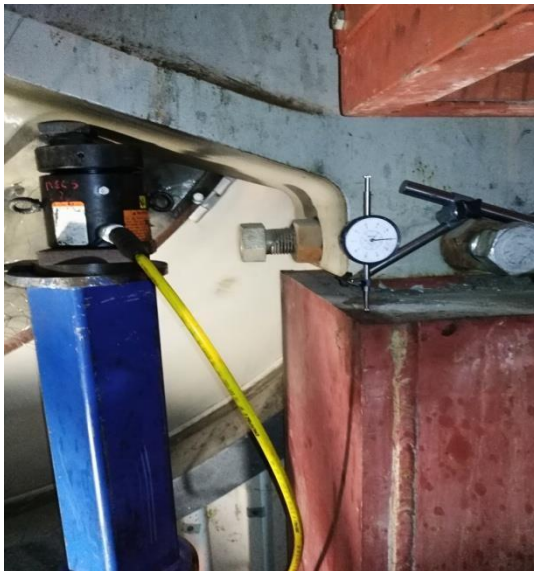
#### IV.4.2.1- Défaut d'alignement :

Le défaut d'alignement est une des principales causes de réduction de la durée de vie des machines tournantes. Il crée des efforts importants qui vont :

- Entraîner la dégradation rapide du système d'accouplement,
- Dans le cas de paliers lisses, induire des instabilités du film d'huile et mettre en péril la machine.

#### IV.4.3- Remèdes:

Une opération d'alignement est primordiale afin de pouvoir palier a ce défaut de délignage, les principaux étapes de la correction sont montrés dans les images suivantes :



Correction pied compresseur



Correction pied turbine

#### IV.5- Conclusion:

Pour surveiller tous défauts présents dans une machine tournante, il est utile de mesurer les vibrations à l'intérieur et à l'extérieur des paliers hydrodynamique. Il est donc du plus haut intérêt à la fois pour le constructeur et l'exploitant de supprimer ou tout au moins de limiter les vibrations afin de prolonger la durée de vie de matériel pour optimiser leur rendement et pour assurer leur régularité de fonctionnement.[1]

# ***Conclusion générale***

## **Conclusion :**

Le travail accompli dans le cadre de ce projet de fin d'études nous a permis de conclure un stage effectué au niveau de la centrale thermique de Berrouaguia SKB, où nous avons appris beaucoup de choses sur la complexité du monde industriel et sur l'organisation du travail au niveau des unités de production électricité.

Le service d'instrumentation de la centrale est chargé de la tâche pré-commissionning (préparation du premier démarrage de la machine objet d'une révision majeure), notre présence sur site nous a énormément aidés durant notre étude.

Cette étude nous a donné l'occasion d'appliquer nos connaissances dans le domaine de traitement signal, connaissances qu'il a fallu approfondir pour procéder à des analyses spectrales et aussi des notions sur l'instrumentation installée sur le procès de génération de l'électricité.

Ce travail nous a permis, en plus des connaissances pratiques, la maîtrise de la théorie adapté pour la conception des turbines à gaz.

Le dommage enregistré sur le coussinet inférieur, et la prédominance du deuxième harmonique du spectre (délignage) coté palier excitatrice, ont confirmés que le traitement de signal demeure comme outil incontournable pour l'analyse des vibrations des machines tournantes.

# Bibliographie

---

- [1] Document de formation: « les mesures des vibrations sur les paliers hydrodynamiques », 2017.
- [2] Mémoire de fin d'étude : « Maintenance conditionnelle par analyse vibratoire dans une centrale électrique à turbine à gaz », Kious Mohammed Moncef et Bousbia Salah Ammar, Ouargla, 2019-2020.
- [3] Base des Signaux - INP Toulouse.
- [4] Traitement du Signal, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Christophe DOIGNON, 2008-2009.
- [5] Eléments de base pour le Traitement Numérique du Signal et de l'Image, Maurice Charbit, Gérard Blanchet, 25 Mars 2010.
- [6] Rappels Traitement du Signal, Licence Professionnel Optronique, T.Dumartin, Année 2004 -2005.
- [7] Chaib Rachid La maintenance industrielle. Editions université de Constantine 2003/2004.
- [8] Bruel & Kjaer vibro. Analyse vibratoire MC-vibration. Rév. A septembre 2001.
- [9] Les Bases du Traitement des Signaux Numériques. Université Paul Sabatier. Andrei Doncescu.
- [10] Jean Héng Pratique de la maintenance préventive, mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid. Dunod, paris 2002. ISBN 210 00 65610.
- [11] Technique d'ingénieur, Surveillance vibratoire et maintenance prédictive.
- [12] pointe Jarry : une nouvelle centrale électrique pour la Guadeloupe, EDF Guadeloupe, 2012.
- [13] Guy Binet : Traitement numérique du signal – Signaux et systèmes discrets, Ellipses, 2013.